

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ББК 31.291

C24

УДК 621—83:621.313.13

Рецензенты: кафедра «Электропривод» МЭИ, Б. А. Ивоботенко

Свечарник Д. В.

C24 Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.: ил.

ISBN 5-283-00488-0

Излагаются основы построения безредукторного электропривода, у которого электродвигатель непосредственно связан с приводимым в движение механизмом. Основное внимание уделено, в частности, линейным и дуговым электродвигателям, а также машинам «двойного движения».

Для инженеров и научных работников, занятых в области электрических машин и привода. Может быть также полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

C 2302050000-498
051 (01)-88 57-88

ББК 31.291

Производственное издание

Свечарник Давид Вениаминович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРИВОДА. БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Редактор Ю. М. Келим

Редактор издательства Л. Д. Никулина

Художественный редактор Б. Н. Тумин

Технический редактор Т. Ю. Андреева

Корректор Р. К. Шилова

ИБ № 2465

Сдано в набор 18.05.88. Подписано в печать 12.09.88. Т-18701. Формат 60×88¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,74. Усл. кр.-отт. 12,98. Уч.-изд. л. 14,77. Тираж 9 000 экз. Заказ 3118. Цена 75 к.

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валуевая, 28.

ISBN 5-283-00488-0

© Энергоатомиздат, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электропривод потребляет основную долю производимой в мире электроэнергии. Электростанции и линии передач, трансформаторные подстанции и системы управления строятся главным образом для того, чтобы питать электропривод. Правильное решение основных проблем развития электропривода имеет важное значение для экономики страны. Каждое новшество должно повысить эффективность действия оборудования — для промышленных устройств, в частности для промышленного электропривода, это понятие соответствует экономическому результату от введения нового типа оборудования для всего народного хозяйства. Необходимость именно такого подхода была давно ясна ведущим ученым-разработчикам новых видов оборудования.

Так, и М. О. Доливо-Добровольский, и М. Видмар призывали «минимизировать не стоимость трансформатора, а стоимость трансформации». В предлагаемой читателю книге показано (гл. 1), что электромашиностроители умело и настойчиво проводят субоптимизацию своей продукции: снижают металлоемкость, уменьшают габаритные размеры, снижают стоимость электрических машин — в основном за счет повышения частоты их вращения. Действительно, высокоскоростные машины имеют существенно лучшие массогабаритные показатели. Так, двигатель для привода рольгангов мощностью в 1 кВт при частоте вращения 200 об/мин всего лишь в 2,6 раза легче двигателя полезной мощностью в 160 кВт при 2955 об/мин. Но механизмы, для которых создается электропривод, чаще требуют существенно более низких частот вращения или скоростей перемещения.

Традиционным решением, применяемым для обеспечения низких частот вращения рабочих механизмов, является высокоскоростной двигатель с редуктором. Системный подход, анализ с позиции наибольшей эффективности для всего народного хозяйства приводит к выводу, что суммарная масса, габаритные размеры и стоимость при указанном традиционном решении двигателя и редуктора в достаточно большом классе применений весьма существенно отличаются от соответствующих параметров самих двигателей. Рассмотрение главной альтернативы — безредукторных электроприводов (т. е. электродвигателей, непосредственно связанных с рабочим механизмом), являющееся основным содержанием книги, представляет, таким образом, существенный практический интерес.

Речь идет, конечно, не о «ликвидации редукторов» — это устройство полезное, и в ряде случаев незаменимое — оно достигло высоких степеней совершенства. Задача книги — обосно-

вать возможность существенного расширения областей применения безредукторного привода — низкоскоростных электродвигателей вращательного, поступательного и возвратно-поступательного типов, выявить его особенности, установить достигнутое и рассмотреть перспективы дальнейшего развития.

Задача создания безредукторного электродвигателя может быть решена при сохранении принципа «движения приводящего и приводимого элемента в одной и той же координате». Это многополюсные машины с питанием от промышленной сети или источника пониженной частоты, машины с катящимся ротором, машины с питанием ротора и статора от источников с разной частотой, редукторные двигатели, машины, работающие на субгармониках магнитного поля, и аналогичные. Рассмотрению этих устройств посвящена гл. 2. Тот же вид движения используется и в получивших значительное развитие в последнее время линейных и дуговых двигателях. Их возможности и проблемы, характеристики и перспективы развития рассмотрены в гл. 3. Значительное внимание в книге уделено относительно новому принципу создания безредукторного электропривода с движением приводящего и приводимого в движение элементов во взаимно-перпендикулярных направлениях так называемых машин двойного движения, у которых ротор (или система роторов) совершает быстрое вращательное движение относительно статора, а статор, связанный непосредственно с рабочим элементом привода, медленное вращательное, поступательное или возвратно-поступательное движение. Своеобразие этих машин, их благоприятные энергетические и массогабаритные возможности, с одной стороны, и отсутствие основ их теории и расчета до настоящего времени, с другой стороны, обусловили значительный объем посвященной им гл. 4. Преодолевать трудности, связанные с охватом широкого круга вопросов, с изложением как принципиально новых идей и конструкций, так и системного рассмотрения технических и экономических вопросов существующих устройств автору помогли соратники, консультанты и благодетельные критики — д-р техн. наук, проф. Б. А. Ивоботенко и д-р техн. наук, проф. П. Ю. Каасик, канд. техн. наук, ассистенты и инженеры — Р. И. Батырев, Л. А. Гирская, О. Н. Матеранская, В. Б. Муляр, В. В. Ростовцев, М. А. Суханова, Е. Т. Чернов, С. Н. Яловега, спасибо им. Автор также благодарит кафедру «Электропривод» МЭИ, которая рассмотрела рукопись и дала свои замечания, принятые автором с признательностью. Особая благодарность внимательному и терпеливому редактору этой книги Ю. М. Келиму. Автор заранее благодарит также читателей, которые пришлют свои замечания по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Энергоатомиздат.

Автор

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ И ЭЛЕКТРОПРИВОД

1.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Основной задачей привода является обеспечение требуемого движения рабочего органа («машины-орудия»). Так, комплектное устройство электродвигатель с редуктором, обычно называемое электрическим исполнительным механизмом (рис. 1.1), является электроприводом связанного с выходным валом устройства рабочего органа, например задвижки, перекрывающей течение жидкости, пара или газа в технологическом процессе. Масса редуктора составляет примерно 80% от всей массы исполнительного механизма, габаритные размеры редуктора однозначно определяют собой размеры всего механизма. Соотношение объемов редуктора и двигателя не случайно. Частота вращения ротора электродвигателя 2400 об/мин, выходного вала механизма 0,6 об/мин; как будет показано ниже, значительные передаточные числа редукторов характерны для широкого класса приводов. Редуктор вносит в привод не только свою массу и объем, но и люфты, меняет упругий характер сочленений, момент инерции и другие параметры. А задачей электропривода является не просто приведение в движение рабочего органа и не только обеспечение при этом наиболее благоприятных энергетических и массогабаритных показателей, но и выполнение сложного комплекса условий, обеспечивающих требуемое качество этого движения: заданное ускорение при трогании с места или изменении установившейся скорости, точность выдерживания этой скорости, точность остановки и желательный характер переходного режима. Эти тре-

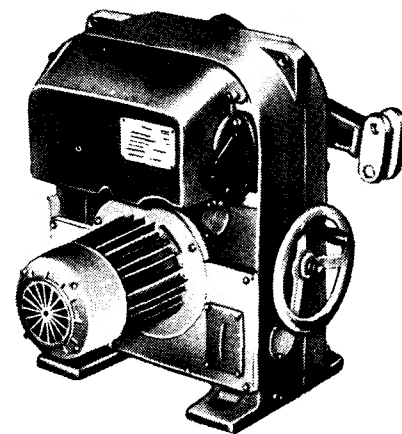


Рис. 1.1. Электрический исполнительный механизм МЗО-63/25-0,25

бования в определенной части противоречивы. Так, высокая скорость торможения обеспечивает малое время переходного процесса от установившейся скорости до остановки, но затрудняет точное осуществление заданного перемещения. Обеспечение больших ускорений входит в противоречие с получением высоких энергетических показателей. Поэтому составной частью электропривода, кроме электродвигателя и передаточного механизма, в большинстве случаев включающего редуктор, принято считать и систему управления, а также преобразователи и источники питания — не столько с точки зрения технического выполнения элементов этих устройств, сколько с точки зрения влияния принципов (способов) управления, положенных в основу указанной системы, на характеристики электропривода. В энциклопедии «Автоматизация производства и промышленная электроника» (М.: Советская энциклопедия, 1965. Т. 4. С. 413) автоматизированный электропривод определяется как «машинное устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую и обеспечивающее автоматическое управление преобразованной механической энергией».

Электропривод завоевывает все новые области применения. Так, если в 1976—1978 гг. электропривод составлял лишь 8—12% общего числа приводов промышленных роботов, то в 1980—1981 гг. его доля достигла уже 30—32% и продолжает возрастать [21]. Это заставляет разработчиков пристально всматриваться в рациональные соотношения между двигателем и редуктором. При решении задачи минимизации массы модуля электропривода робота, включающего в себя электродвигатель и редуктор, в [36] вводятся понятия удельного номинального момента двигателя $\lambda_{дв} = M_{дв} / m_{дв}$ и редуктора $\lambda_{ред} = M_{ред} / m_{ред}$, где $M_{дв}$ и $m_{дв}$ — соответственно номинальный момент и масса двигателя; $M_{ред}$ и $m_{ред}$ — то же для редуктора. В [36] указывается, что для существующих электродвигателей и редукторов $\lambda_{ред} > 10\lambda_{дв}$, и принимается в качестве условия рациональности передаточное число редуктора $i > (2,5—5) \lambda_{ред} / \lambda_{дв}$. Возможно, что для определенного класса роботов данное соотношение рационально, но в целом такой подход никак нельзя признать универсальным: если для общности приводить моменты $M_{дв}$ и $M_{ред}$ к одной и той же оси, то они равны друг другу и значение $\lambda_{ред} / \lambda_{дв} = m_{дв} / m_{ред}$ переменное. В большом числе приводов это соотношение никак не достигает 10 — оно может быть и намного меньше, что иллюстрирует, например, табл. 1.1 для весьма малых мощностей. Но и для больших мощностей указанное соотношение бывает существенно меньше 1; так, у эскалатора метро $m_{дв} = 0,8$ т; $m_{ред} = 18$ т; у цилиндрической мельницы МБ70-23 $m_{дв} = 10,25$ т; $m_{ред} = 48$ т (без оконечной пары массой 18,5 т).

Для оценки возможностей общего подхода, предусматривающего рассмотрение электрической машины исходя из ее основных

Таблица 1.1. Исполнительные механизмы

Тип механизма	Масса, кг			$m_{дв}/m_p$
	всего механизма	редуктора m_p	электродвигателя $m_{дв}$	
МЭО-10/25-0,25	26	21	1,5 *	0,07
МЭО-25/25-0,25	30	21	5,8 *	0,276
МЭО-63/25-0,25-68	95	77	11,0 *	0,143
МЭО-63/25-0,25К-68	90	77	4,3 **	0,056
МЭО-160/25-0,25	185	140	30,0 *	0,215
МЭО-160/25-0,25К	155	140	4,3 **	0,03

* Двигатель типа ДАУ изготавливается малыми сериями.

** Двигатель единой серии 4А.

Редуктор имеет 5 пар шестерен и передаточное число у механизмов с индексом К — 2100, у остальных механизмов — 4100.

физических возможностей, исследуем машину постоянного тока, для которой ряд массогабаритных соотношений детально изучен.

Направленное по касательной к окружности якоря усилие на единицу площади поверхности якоря (в Н/м²)

$$F' = \alpha_i B_\delta A, \quad (1.1)$$

где α_i — отношение расчетной полюсной дуги к полюсному делению τ ; B_δ — индукция в зазоре, Тл; A — линейная нагрузка якоря, А/м.

Величина усилия

$$F = F' 2\pi r l, \quad (1.2)$$

где r — радиус якоря; l — расчетная длина якоря.

Момент, Н·м,

$$M = Fr = F' 2\pi r^2 l. \quad (1.3)$$

Объем якоря (обычно ротора)

$$V_p = \pi r^2 l. \quad (1.4)$$

Масса ротора

$$m_p = \gamma_{cp} \pi r^2 l, \quad (1.5)$$

где γ_{cp} — средняя плотность массы якоря, кг/м³.

Важная характеристика использования машины — отношение момента, реализуемого на поверхности якоря, к массе якоря равно удвоенному отношению средней плотности усилия к средней плотности массы и инвариантно относительно размеров якоря:

$$M/m_p = 2F'/\gamma_{cp}. \quad (1.6)$$

Плотность усилия F' у машины крупногабаритной (низкоскоростной) обычно выше, чем у малой (высокоскоростной); средняя плотность γ_{cp} , наоборот, несколько ниже у крупногабаритной

машины со значительными вырезами в пакетах якоря. В целом эта характеристика (M/m_p) выше у крупногабаритной машины.

Так, например, при $\gamma_{cp} = 5 \cdot 10^3$ кг/м³ и характерных для относительно крупногабаритных машин $\alpha_i = 0,7$; $B_\delta = 0,7$ Тл и $A = 50 \cdot 10^3$ А/м, т. е. $F' = 2,5 \cdot 10^4$ Н/м², имеем $\lambda_{dv} = 10$ Н·м/кг массы якоря. Приведенная в [36] в качестве довольно высокой величина $\lambda_{dv} = 0,4$ для двигателей французской фирмы АХЕМ получена, по-видимому, из-за существенно более низких у малых машин значений $F' = \alpha_i B_\delta A$. Такое значение может иметь место, например, при $B_\delta = 0,4$ Тл и $A = 5000$ А/м.

Менее однозначно выглядит отношение номинального момента к массе всей машины $\lambda = M/m_{dv}$; отношение массы двигателя к массе или объему якоря неоднозначно и зависит в значительной мере от числа пар полюсов.

В [63] приводится предложенная В. И. Бочаровым формула для массы тяговых двигателей:

$$m_{dv} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{p}} D_a^2 l_a \quad (1.7)$$

где p — число пар полюсов; D_a и l_a — соответственно диаметр и длина якоря.

Преобразуем эту формулу в целях ее несколько расширенного применения в приведенных выше соотношениях. Из (1.5) имеем

$$D_a^2 l_a = \frac{4m_p}{\gamma_{cp} \pi} \quad (1.8)$$

Подставляя (1.8) в (1.7), получаем массу двигателя

$$m_{dv} = \frac{10}{\sqrt{p}} m_p \quad (1.9)$$

так как $\frac{40 \cdot 4 \cdot 10^3}{\gamma_{cp} \pi} \approx 10$ при принятом $\gamma_{cp} = 5 \cdot 10^3$ кг/м³ и отношение номинального момента к массе двигателя

$$\lambda_{dv} = \frac{M}{m_{dv}} = \frac{M}{m_p} \frac{\sqrt{p}}{10} = 0,2 \sqrt{p} \frac{F'}{\gamma_{cp}} \quad (1.10)$$

Если учесть, что у низкоскоростных машин для безредукторного привода число пар полюсов намного больше, чем у высокоскоростных, можно, несмотря на приближенный характер формулы (1.10), с полным основанием утверждать, что значение λ у низкоскоростной машины в несколько раз больше, чем у высокоскоростной. Так, при $p = 16$ λ будет больше, чем при $p = 1$, в 4 — 5 раз, если учесть различие в значениях F' и γ_{cp} .

Ниже при сравнении двигателей мы в основном пользуемся величиной, обратной λ_{dv} :

$$m''_{dv} = 1/\lambda_{dv} = \frac{5\gamma_{cp}}{F' \sqrt{p}} \quad (1.11)$$

или отношением массы к номинальному моменту в кг/кН:

$$m''_{dv} = \frac{5 \cdot 10^3 \gamma}{F' \sqrt{p}} \quad (1.12)$$

Практика неизменно подтверждает приведенные выше положения и не только в отношении машин постоянного тока обычного исполнения, но и для специально разработанных так называемых моментных двигателей. Так, в проспекте [107] фирмы Inland (США) на моментные двигатели постоянного тока прямого привода (Direct-Drive DC Torque Motors) у 12-ваттного микро-двигателя T2509 при $n_{x,x} = 2100$ об/мин ($n_n = 1200$ об/мин; $\omega = 0,105n = 125$ с⁻¹ при $M_{ном} = 0,1$ Н·м) имеем $m_{dv} = 0,127$ кг; $m''_{dv} \approx 1270$ кг/(кН·м), а у двигателя T36001 при мощности 1830 Вт и $n_{x,x} = 17,2$ об/мин ($n_n \approx 8$ об/мин при $M_{ном} = 2160$ Н·м) $m_{dv} = 616$ кг и $m''_{dv} = 285$ кг/(кН·м), примерно, в 5 раз лучше, так как машина большая и низкоскоростная. Отметим, что эта машина специально предназначена для работы в пусковых режимах и имеет кратность пускового момента 2, следовательно, удельная масса относительно пускового момента будет 143 кг/(кН·м).

Но электромашиностроители обычно пользуются в качестве массогабаритного показателя отношением массы (или объема) якоря (или иногда всей машины) к мощности, реализуемой на валу.

Основные соотношения, позволяющие определить массогабаритные характеристики электрической машины в этом понимании, выведены давно. Так, для машины постоянного тока это сделано Е. Арнольдом [63] еще в первой четверти века. Так называемая постоянная Арнольда (или машинная постоянная) определяет произведение диаметра ротора (якоря) D на его длину l , приведенное к полезной мощности P при n (об/мин) в зависимости от основных электромагнитных параметров — индукции в зазоре B_δ , линейной нагрузки A (А/м) и эквивалентной полюсной дуги α_i :

$$\frac{D^2 l}{P} n = \frac{6,1 \cdot 10^3}{\alpha_i B_\delta A} = C_A = \frac{6,1 \cdot 10^3}{F'}$$

или, учитывая, что $\alpha_i B_\delta = B_{cp}$, имеем $\frac{D^2 l}{P} n = \frac{6,1 \cdot 10^3}{B_{cp} A} = C_A$. Для определения отношения массы двигателя к его мощности m' (в кг/кВт) можно использовать формулу (1.12), учитывая, что

$$M = P \cdot 10^3 / \omega; m''_{dv} = m_{dv} / M = m_{dv} \omega / P \cdot 10^3 = m' \omega \cdot 10^{-3},$$

или

$$m'_{dv} = m'' \cdot 10^3 / \omega = \frac{5 \cdot 10^3 \gamma}{\omega F' \sqrt{p}}, \quad (1.13)$$

или, подставляя $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$,

$$m'_{дв} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{\pi} \frac{\gamma}{n F' \sqrt{p}}.$$

Так, при $\gamma = 5 \cdot 10^3$ кг/м³, $p = 1$, $\omega = 300$ с⁻¹ и $F' = 2,5 \times 10^4$ Н/м² имеем $m'_{дв} = 3,3$ кг/кВт, что близко к реальным данным для частоты вращения $n = 2865$ об/мин (соответствующей $\omega = 300$ с⁻¹). Если $p\omega = \text{const}$, то со снижением частоты вращения двигателя в k раз показатель $m'_{дв}$ увеличивается примерно в $\sqrt{k}$ раз, а показатель $m''_{дв}$ уменьшается во столько же раз. Но

строгое постоянство произведения $p\omega$ имеет место только у синхронных машин, у машин постоянного тока вполне возможны существенно различные частоты вращения ротора и при неизменном числе пар полюсов p . В этом случае при практически неизменном $m'_{дв}$ (если сохраняется отношение γ/F') показатель $m'_{дв}$ увеличивается пропорционально уменьшению ω . Электромашинистры предпочитают пользоваться именно последним показателем.

Естественно, что электромашинистры, проводя оптимизацию, стремятся к созданию высокоскоростных электродвигателей.

Но для электропривода оптимизация по указанной выше целевой функции, применяемая к электродвигателю, является только субоптимизацией, экономически оправданной лишь в тех случаях, когда она по крайней мере не противоречит общей оптимизации. Представляется рациональным при той же целевой функции (минимуме приведенных затрат) приводить выбор оптимальных решений, учитывая их эффективность для электропривода в целом. Конечно, полным был бы анализ эффективности выбранных решений для народного хозяйства в целом (например, анализ оптимальности выбора также и данного рабочего органа и его режимов работы, данной технологии в совокупности и т. д.). Но эта задача здесь не рассматривается. Во всяком случае сравнительное изучение различных решений исходя из эффективности электропривода в целом представляется шагом в правильном направлении — именно такой анализ может объективно определить области преимущественного применения редукторного и безредукторного электропривода.

Низкоскоростные механизмы весьма распространены. Анализ данных, приведенных в табл. 1.2—1.4, позволяет отметить ряд важных отличий различных типов электропривода в целом. Основной вывод: в рассмотренных промышленных приводах редуктор по своей массе и стоимости намного превосходит электродвигатель. Это положение подтверждается и при рассмотрении весьма крупногабаритных приводов. Так, в электроприводе мельницы типа «Каскад» применен электродвигатель СДМ-15-49-6 массой в 10,25 т и стоимостью около 10 тыс. руб. с понижающим редук-

Таблица 1.2. Вакуум-фильтры барабанные

Тип	Вращающий момент органа, кН·м	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, кг		
			общая	привода	двигателя
БОК1-1,0	58	0,6	980	215	10
БОУ5-1,75	100	1,1	4990	1000	23
БОК5-1,75	100	1,1	2500	1000	19
БОУ10-2,6	200	2,2	7858	1100	43
БОК10-2,6	200	2,2	5650	1100	43
БОУ20-2,6	300	3,1	12 432	1220	60

Примечание. Номинальная частота вращения рабочего органа 1 об/мин, диапазон регулирования 0,13—2 об/мин.

Таблица 1.3. Вакуум-фильтры ленточные

Тип	Диапазон регулирования частоты вращения, об/мин	Номинальная частота вращения, об/мин	Вращающий момент, кН·м	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, кг		
					общая	привода	двигателя
Л1,6-0,5-3,2	0,8÷4,8	3,0	350	3,1	3 600	330	43
Л2,5-0,5-4,8	0,8÷4,8	3,0	420	3,1	4 170	380	43
Л3,2-0,5-6,4	1,0÷6,0	3,5	510	5,5	5 060	760	74
ЛН4-0,5-8,0	1,5÷9,0	4,5	580	5,5	6 470	860	74
ЛУ10-1,25-8	4,0÷10	7,0	1120	10	20 760	1300	140

Таблица 1.4. Вакуум-фильтры дисковые

Тип	Диапазон регулирования частоты вращения, об/мин	Номинальная частота вращения, об/мин	Вращающий момент органа, кН·м	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, кг		
					общая	привода	двигателя
ДУ16-2,5	0,22—0,97	0,5	3	1,1	5 600	510	19
ДУ32-2,5	0,22—0,97	0,5	5	1,1	8 860	620	19
ДУ50-2,5	0,2—1,3	0,8	7	2,2	10 510	820	43
ДУ51-2,5	0,2—1,3	0,8	7	2,2	4 650	820	43
ДУ63-2,5	0,2—1,3	0,8	9	2,2	12 400	820	43
ДУ80-2,5	0,2—1,3	0,8	12	3,1	13 400	1050	60

тором ($i = 13$) типа Ц2Ш1250 массой 36 т и стоимостью 48 тыс. руб., еще имеется выходная шестеренная пара массой 18,5 т и стоимостью около 48 тыс. руб. (стоимость несерийной части передачи выше у всех приводов). В приводе барабанных вакуум-фильтров БОУ-10-26 и БОК-10-26, указанных в табл. 1.3, используется электродвигатель мощностью 2,2 кВт массой 43 кг с редуктором массой 565 кг и шестеренная пара массой 500 кг и стоимостью 800 руб. Чем выше частота вращения двигателя и

меньше масса, габаритные размеры и стоимость двигателя, тем больше (при той же заданной частоте вращения выходного вала привода) редуктор — его масса, габаритные размеры и стоимость в основном определяют соответствующие показатели привода. Возникает конфликтная ситуация: электромашиностроитель, минимизируя собственные затраты (кг/кВт) и повышая КПД двигателя, увеличивает его частоту вращения, а потребитель платит за это увеличением массы и стоимости редуктора, и во всех случаях, аналогичных приведенным выше, народное хозяйство в целом теряет от такой субоптимизации.

В ряде мест специалисты в области привода и технологии вполне это осознали и принимают реальные меры к снижению частоты вращения двигателя. Выше приводились данные по мельнице типа «Каскад» ($n = 13$ об/мин), применяемой на горно-обогачительных комбинатах.

За последние годы наметилась в ряде случаев тенденция к исключению основного редуктора. Результаты проведенной в этом направлении работы на одном из предприятий приведены в табл. 1.5. Частота вращения двигателя снизилась в 8 раз, масса его возросла в 2,7 раза, стоимость в 2,5 раза, но общая масса двигателя и редуктора снизилась с 58,25 до 27,7 т — в 2,1 раза, стоимость снизилась в 2—2,3 раза. Повысилась и надежность не только путем устранения отказов, связанных с самим редуктором (1—2 раза в год — разрыв бандажей, излом вала быстроходной и промежуточной шестерен, поломки зубьев и муфты), но и путем улучшения условий работы самого двигателя при устранении вибраций, вызванных редуктором. Реально частота отказов уменьшилась примерно в 6 раз. В [36] указывается, что каждый элемент редуктора имеет шесть основных элементов износа — четыре подшипника и две зубчатые шестерни — и приводятся данные о высокой надежности системы управления с безредукторным приводом — долговечность 15—20 лет при техническом ресурсе $(5—6) \cdot 10^4$ ч и вероятность безотказной работы 0,99.

Таблица 1.5. Привод мельниц

Тип мельницы «Каскад»	Производительность, т/ч	Тип двигателя	Масса двигателя, т	Частота вращения двигателя, об/мин
МБ 70-23 с редуктором Ц2Ш-1250	82,4	СДМ-15-49-6	10,25	1000
МБ 70-23 без редуктора	82,4	СДС-19-56-48	27,7	125
ММС 70-23 с редуктором Ц2Ш-1250	109,7	СДМ-15-49-6	10,25	1000
ММС 70-23 без редуктора	109,7	СДС-19-56-48	27,7	125

Примечание. Мощность двигателя 1600 кВт, частота вращения мельницы 13 об/мин.

В [94] приводятся соображения о компактности двигателя и ее влиянии на экономические показатели промышленной установки в целом. Из рассматриваемого примера следует, что нужно стремиться к компактности **всего привода**, хотя бы при этом сам двигатель стал менее компактным. Действительно, в приведенном выше примере объем низкоскоростного двигателя 25 м^3 , а высокоскоростного — только $8,5 \text{ м}^3$, но к этому нужно добавить еще объем редуктора 30 м^3 , и, следовательно, получаем в 1,5 раза больший суммарный объем привода с высокоскоростным двигателем, чем с низкоскоростным.

В [94] убедительно показано также значение снижения шума и вибраций двигателя при оптимизации его параметров. Но и по этим параметрам, если двигатель не работает без редуктора, надо, по-видимому, приводить анализ для всего электропривода, так как известно, что в таком комплекте основную составляющую шума и вибрации дает именно редуктор. Рассмотрим некоторые количественные соотношения по удельной массе m' , кг/кВт, для различных электроприводов.

Если пометить индексами «В» и «Н» параметры электропривода соответственно с высокоскоростным и низкоскоростным двигателями, то удельная масса редукторного электропривода $m'_{\text{пв}}$, например, для электрических исполнительных механизмов (см. табл. 1.1) с высокоскоростным электродвигателем $m'_{\text{дв}} = 700 \div 1100$ кг/кВт; для приводов химического оборудования (табл. см. 1.2—1.4) $m'_{\text{дв}} = 400 \div 900$ кг/кВт. Это в основном маломощные приводы. Что же касается мощных приводов мельниц (табл. 1.5), то при расчете необходимо принимать во внимание и окончательную часть редуктора с массой около 18,5 т, остающейся у обеих модификаций привода. Тогда, принимая полезную мощность $P_2 \approx 1500$ кВт (момент на рабочей оси $M \approx 10^3$ кН·м), имеем

$$m'_{\text{пв}} = \frac{10\,500 + 18\,500 + 48\,000}{1500} \approx 51 \text{ кг/кВт}$$

и

$$m'_{\text{пн}} = \frac{27\,700 + 18\,500}{1500} \approx 31 \text{ кг/кВт},$$

т. е. для низкоскоростного электропривода в 1,66 раз меньше. Естественно, что разработчики электропривода сейчас работают над приводом, использующим сверхнизкоскоростной электродвигатель с частотой вращения, равной частоте вращения мельницы $n \approx 12,5$ об/мин, не требующий окончательной части редуктора, которая оставалась у предыдущей модификации.

Спроектирован такой электропривод для еще более мощной мельницы ($P = 6300$ кВт), но разработанный для этой цели синхронный двигатель имеет не 480 полюсов, как это было бы необходимо при питании током промышленной частоты, а только 60 и предусмотрено питание от специального источника пониженной

частоты $f = 6,25$ Гц. Такая схема вносит в привод элемент «электронного редуктора», стоимостные и массогабаритные показатели которого также должны быть учтены при оценке показателей электропривода в целом. В определенной мере такая оценка для близких по типу схем будет дана ниже, а здесь нам хотелось отметить определенную тенденцию создания электропривода действительно безредукторного с использованием традиционного типа электродвигателя — синхронного, многополюсного, с довольно высокими показателями самого двигателя ($\eta = 0,92$; $\cos \varphi = 0,975$; допустимая статическая перегрузка 1,65).

Приведенные материалы, по-видимому, позволяют считать, что массогабаритные показатели безредукторного электропривода для низкоскоростных устройств вполне сравнимы с массогабаритными показателями редукторного электропривода, если учитывать массу и габаритные размеры не только двигателя, но и всего редуктора. Как видно из табл. 1.6 [49], и для серийных редукторов велико отношение массы к моменту.

Оптимизировать по целевой функции «минимум приведенных затрат для народного хозяйства» следует при рассмотрении привода в целом; оптимизация параметров приводного двигателя, в частности его частоты вращения, без учета всех устройств, необходимых для заданной частоты вращения приводимого в движение механизма, может привести к ложным результатам.

Таблица 1.6. Характеристики редукторов

Типоразмер редуктора	Переда- точное число i	КПД η	Мощность P , кВт	Крутящий момент на выходном валу M , Н·м	Масса (без ма- сла) m , кг	m' , кг/кВт	$\frac{m''}{\text{кН·м}}$, $\cdot 10^3$
РЧУ-40	9,5	0,80	0,46	23	6,5	14,1	2,21
	19	0,67	0,29	23		22,4	3,5
	30	0,57	0,22	23,5		29,5	4,6
	38	0,53	0,19	23		34,2	5,4
	64	0,43	0,10	17,7		65	10,15
РЧУ-63	10	0,84	1,5	80,4	12,2	8,13	1,28
	20	0,73	0,86	80,4		14,1	2,23
	32	0,64	0,64	83,4		19,06	2,99
	40	0,60	0,53	80,4		23	3,62
	66	0,50	0,31	65,7		39,3	6,19
РЧУ-80	10	0,85	2,76	149	17,8	6,45	1,01
	20	0,76	1,54	149		11,6	1,81
	31	0,65	1,18	157		15,08	2,37
	40	0,63	0,93	149		19,1	3,00
	64	0,55	0,59	137		30,16	4,73

Примечание. Для быстроходного вала $n = 1500$ об/мин ($\omega = 157$ с⁻¹).

1.2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Существенными параметрами электропривода, в основном определяющими его динамические свойства, являются электро-механическая T_m и электромагнитная T_e постоянные времени; большое влияние на качество переходного процесса оказывают люфты в редукторе, упругость сочленения его элементов и др. Переходные процессы в электроприводах (особенно в следящих) детально исследовались, например, в [36], [57], [93], [98]. Рассмотрим относительно подробно лишь T_m , ограничившись в отношении других указанных параметров практически очевидным замечанием, что наличие редуктора ухудшает условия переходного процесса и проведем приближенную оценку влияния редуктора на электро-механическую постоянную времени.

Рассмотрим имеющий принципиальное значение вопрос о сравнительном быстродействии привода с высокоскоростным электродвигателем, связанным с рабочим валом через редуктор с передаточным числом i , и привода с низкоскоростным электродвигателем, вал которого непосредственно связан с рабочим валом. Индекс «В» относится к первому электродвигателю, индекс «Н» — ко второму.

Для приближенной оценки примем, что удельная плотность касательного усилия F' на поверхности якоря у этих двигателей одинакова: $F'_H = F'_B = F'$; $F_H = F' \pi D_H l_H$; $F_B = F' \pi D_B l_B$, где D — диаметр, l — рабочая длина якоря. Примем также, что отношение l/D у этих машин одинаково ($l = aD$). Так как $P_H = \eta P_B$, где η — КПД редуктора, $P = Fv$, линейная скорость на поверхности якоря $v = \omega D/2$, где ω — угловая скорость якоря, и $\omega_B = i\omega_H$; $P_H = F' \pi D_H l_H v_H = F' \pi a D_H^2 \omega_H D_H / 2 = F' a \pi D_H^3 \omega_B / 2i = \eta F' a \pi D_B^3 \omega_B / 2$, откуда

$$D_H = D_B \sqrt[3]{\eta i}. \quad (1.14)$$

Заметим также, что поскольку $P = M\omega$, то $P_H = M_H \omega_H = \eta M_B \omega_B = \eta M_B \omega_H i$ и $M_H = \eta i M_B$.

Можно также принять, что момент инерции цилиндра якоря J_a пропорционален $D^4 l$, т. е. при $l = aD$ $J_a = caD^5$, где c — коэффициент пропорциональности. Тогда

$$J_{Ha} = caD_H^5 = caD_B^5 \eta i^3 \sqrt[3]{(\eta i)^2} = J_{Ba} \eta i^3 \sqrt[3]{(\eta i)^2}. \quad (1.15)$$

Электро-механическая постоянная времени $T_m = \omega J_a / M$, где ω — установившаяся скорость; J_a — приведенный момент инерции; M — действующий момент (обычно значение пускового момента двигателя). Тогда

$$T_{Hm} = \omega_H J_{Ha} / M_H = \frac{\omega_B \eta i^3 \sqrt[3]{(\eta i)^2}}{i^2 M_B \eta} = T_{Bm} \sqrt[3]{\eta^2 / 3 \sqrt{i}}. \quad (1.16)$$

Так как $\eta < 1$, а $i \gg 1$; то $T_{\text{нм}} \ll T_{\text{вм}}$, даже если учитывать в $J_{\text{в}}$ только момент инерции двигателя и не учитывать приведенный момент инерции редуктора. Так, например, при $\eta_{\text{ред}} = 0,7$ и $i = 27$ применение безредукторного привода в соответствии с приведенным выше выводом в 3—4 раза снизит значение $T_{\text{м}}$. Существенно повышает надежность безредукторного привода еще и то обстоятельство, что при принятых соотношениях резко снижается линейная скорость на поверхности ротора. Действительно,

$$v_{\text{н}} = \omega_{\text{н}} D_{\text{н}}/2 = D_{\text{в}}^3 \sqrt{\eta i} \omega_{\text{в}}/2i = v_{\text{в}}^3 \sqrt{\eta/3} i^2; \quad (1.17)$$

в нашем примере $v_{\text{н}} = v_{\text{в}} \frac{0,89}{9} \approx 0,1 v_{\text{в}}$ (при $\eta = 0,7$ и $i = 27$).

Напомним, что при выводе $T_{\text{м}}$ обычно исходят из предположения пуска ненагруженного привода. Намного реальнее предположить пуск двигателя под нагрузкой хотя бы в нашем приближенном рассмотрении — при неизменяющемся со скоростью моменте сопротивления $M_{\text{с}}$. Тогда, сохраняя предположение о линейности механической характеристики двигателя, имеем при $K_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$

$$T'_{\text{м}} = \omega_{\text{в}} \frac{J}{M_{\text{пуск}} - M_{\text{с}}} = \omega_{\text{в}} \frac{J}{M_{\text{пуск}} (1 - 1/K_{\text{пуск}})} = T_{\text{м}} \frac{K_{\text{пуск}}}{K_{\text{пуск}} - 1}. \quad (1.18)$$

Для двигателей с кратностью пускового момента $K_{\text{пуск}} = 1,1$ и $1,2$ это означает соответственно увеличение в 11 и 6 раз реального значения $T'_{\text{м}}$ в сравнении с обычно принимаемым, и снижение $T_{\text{м}}$, которое дает безредукторный привод, становится особо ощутимым. В уже упоминавшихся выше моментных двигателях это обстоятельство учтено: $K_{\text{пуск}}$ относительно велико. Причем здесь возникает интересное обстоятельство, связанное с уменьшением линейной скорости v на поверхности якоря, так как значительное повышение $M_{\text{пуск}}$ (и соответственно пускового тока) у рассматриваемых машин постоянного тока ограничивалось условиями приемлемой коммутации, а реактивная ЭДС $e_{\text{с}}$, определяющая собой в основном характер коммутации, как известно, пропорциональна v и току якоря I (или линейной нагрузке A). При меньших скоростях и прочих равных условиях допустимо, таким образом, применять форсированный по току (и, следовательно, моменту) пуск практически до номинального значения скорости; в реальных условиях переменной форсировки это означает еще большее снижение времени пуска. На рис. 1.2 показан характерный график изменения тока I по условиям предельно допустимой коммутации моментного двигателя с номинальной частотой вращения 500 об/мин, добротность этого двигателя (отношение пускового момента к моменту инерции) составляет 4500 с^{-2} .

Рассмотрим влияние электромеханической постоянной времени на регулирование скорости исполнительных электродвигателей.

Рис. 1.2. Зависимость тока от частоты вращения моментного двигателя

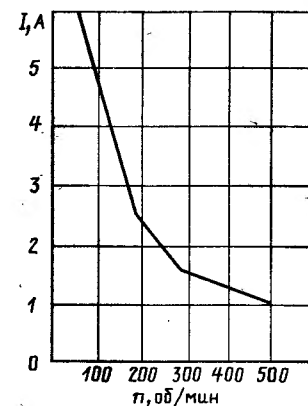
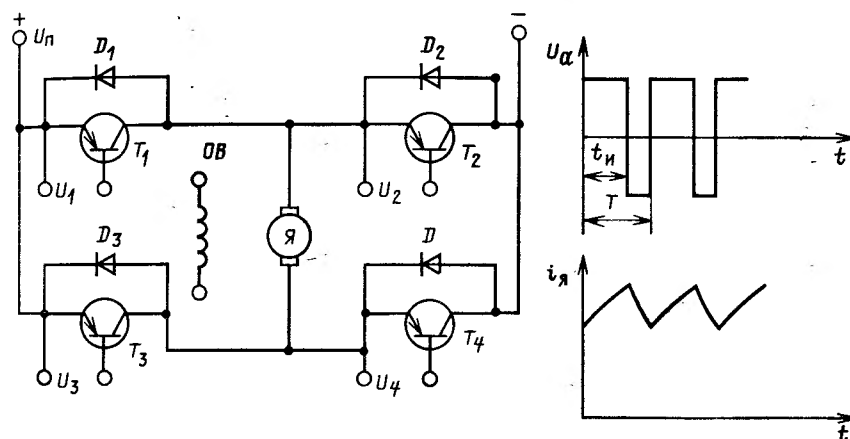


Рис. 1.3. Схема широтно-импульсного управления двигателем постоянного тока



В системах автоматического регулирования достаточно широкое распространение получил импульсный способ регулирования скорости электродвигателей. Положительными качествами такого способа являются простота управляющей аппаратуры, ее малый вес и габаритные размеры, довольно высокий КПД, достаточно широкий диапазон регулирования скорости. При импульсном способе управления частотой вращения изменение скорости достигается не за счет изменения мощности, непрерывно подводимой к электродвигателю, а за счет изменения времени, в течение которого к электродвигателю подается номинальная электрическая мощность. Иными словами, при импульсном регулировании электродвигатель питается последовательностью импульсов неизменного напряжения $U_{\text{н}}$, в результате чего его работа состоит из чередования процессов разгона и торможения.

На рис. 1.3 изображена [21] схема широтно-импульсного управления двигателем постоянного тока, диаграммы напряжения на якоре $U_{\text{а}}$ и тока якоря $i_{\text{а}}$ при переключении транзисторов

T_1, T_4 и T_2, T_3 попарно и в противофазе. Если периоды переключения транзисторов T , как показано на графике $U_a = f(t)$, малы по сравнению с электрохимической постоянной времени T_m и частота вращения двигателя n не успевает к концу каждого периода достигать установившихся значений, то установится некоторое среднее значение n_{cp} , которое при постоянных моменте нагрузки и напряжении питания будет однозначно определяться относительной продолжительностью включения $\tau = t_n/T$, где t_n — длительность импульса.

Мгновенное значение частоты вращения при импульсном управлении будет непрерывно колебаться в определенных пределах. При этом размах колебаний будет прямо пропорционален периоду следования импульсов T и обратно пропорционален электрохимической постоянной времени T_m . Среднее значение скорости изменяется примерно пропорционально относительной продолжительности импульсов, но для того, чтобы скорость вращения однозначно определялась величиной τ , необходимо, чтобы в период отключения (т. е. в паузы длительностью $T - t_n$) двигатель тормозился. Если это условие не будет выполняться, то скорость двигателя при любом значении τ будет непрерывно увеличиваться, пока не достигнет максимального значения — скорости холостого хода, так как за время t_n скорость будет возрастать, а за время паузы оставаться неизменной. Среди электрических методов торможения наибольшее распространение получило динамическое торможение.

В принципе импульсный способ регулирования применим как для двигателей постоянного, так и для двигателей переменного тока. Но предпочтительным для двигателей переменного тока является частотное регулирование. Питание при этом осуществляется от автономных инверторов напряжения или тока. Для реверсивных приводов с диапазоном регулирования скорости свыше 20:1 и для следящих приводов целесообразно применение инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией, что позволяет обеспечить работу привода и в зоне низких скоростей. На рис. 1.4 [21] изображена схема транзисторного инвертора. Применение полупроводниковых приборов как в управляющей части схемы, так и в силовой, позволяет получить быстрое изменение частоты на выходе инвертора. Но достаточно быстрое изменение скорости привода будет обеспечено лишь при малой электрохимической постоянной времени. Длительность переходного процесса при резком изменении частоты примерно пропорциональна T_m — преимущества безредукторного электропривода с меньшим значением T_m здесь очевидны.

Представим приближенно привод в виде инерционного звена с постоянной времени T_m .

Рассмотрим процесс нарастания скорости привода для режима, когда имеют место кратковременные импульсы (длительностью

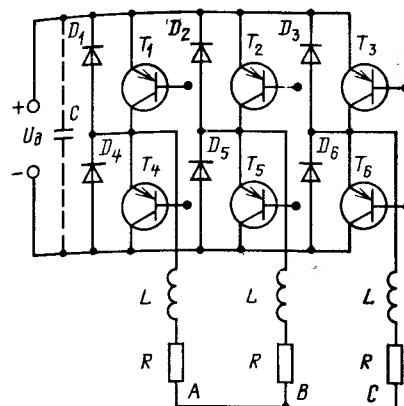


Рис. 1.4. Схема транзисторного инвертора

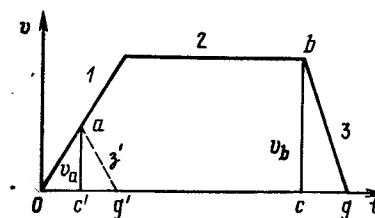


Рис. 1.5. Зависимость скорости привода от времени

$t_n \ll T_m$), следующие друг за другом со значительным интервалом $T \gg T_m$.

Тогда для режима разгона имеем

$$\omega_t = \omega_{\max} (1 - e^{-t/T_m}). \quad (1.19)$$

При разложении в ряд выражения $(1 - e^{-t/T_m}) = t/T_m - (t/T_m)^2 \frac{1}{2!} + \dots$ уже при $t_n/T_m \leq 0,05$ можно ограничиться первым членом разложения с погрешностью примерно 2%.

Тогда

$$\omega_t = \omega_{\max} t/T_m = \omega_0 \frac{t M_{\text{пуск}}}{\omega_0 J_a} = t D, \quad (1.20)$$

где $D = M_{\text{пуск}}/J_a$ — добротность привода.

Возможно, что принимаемые обычно значения добротности $D \geq 5000 \text{ с}^{-2}$ для приводных двигателей исполнительных механизмов, работающих в основном в режиме воздействия кратковременных импульсов, объясняются приведенным выше подходом.

В решении вопроса выбора частоты вращения электродвигателя для относительно низкоскоростного электропривода существенное значение имеет выбор режима работы, который часто рассматривают в общем контексте проблемы управления приводом.

Вопросы управления электроприводом широко освещены в научных и научно-технических изданиях в области следящих систем, включающих электропривод. Как уже указывалось выше, мы будем рассматривать лишь влияние некоторых, практически распространенных способов управления на определение типа электродвигателя, особенно с точки зрения его скоростных свойств, и воздействие выбора способа управления на всю систему в целом.

Рассмотрим два распространенных способа управления электроприводом в промышленных системах автоматического регулирования. Наиболее широко распространена следящая система с релейным сигналом связи регулирующего прибора с приводным электродвигателем, основанная на использовании интегрирующего свойства электропривода. Скорость двигателя не регулируется, при любом рассогласовании параметра регулятор дает сигнал на разгон двигателя до максимальной скорости. Различные перемещения регулирующего органа достигаются различной продолжительностью включения двигателя аналогично рассмотренному выше импульсному регулированию.

Исследование реального хода многочисленных технологических процессов показывает, что требуемая средняя скорость перемещения регулирующего органа не превышает 0,1 от максимально возможной $\omega_{\max}$ с учетом перенастроек, пуска и остановки агрегата и 0,05—0,06 — при нормальном ходе процесса. Сравнительное исследование надежности работы привода с постоянной скоростью, подвергающегося максимальным механическим и электрическим толчкам, и привода с переменной скоростью, избавленного от таких толчков, показывает, что последней скорости привода в 6—8 раз надежнее первого уже при средней скорости 0,1—0,15 $\omega_{\max}$. Эти режимы равнонадежны, лишь когда средняя скорость близка к максимальной.

Приведенные в табл. 1.1 исполнительные механизмы и ряд аналогичных электроприводов управляются именно таким образом. Отсюда они получили название «исполнительные механизмы постоянной скорости». При различных режимах регулирования, как уже указывалось, они обеспечивают разную скорость; постоянной (и обычно довольно высокой) является лишь частота вращения приводного двигателя, однако при реализации относительно малых перемещений эта частота вращения вообще не достигается, при больших — достигается, но обычно на короткое время. Работа осуществляется в так называемом скользящем режиме [92]. В [92] приведено сравнение свойств (в основном надежности) системы управления электроприводом с системой так называемой переменной скорости, использующей низкоскоростной двигатель. Указывается на невысокое качество управления электроприводом в режиме постоянной скорости: отклонение средней эквивалентной скорости и минимального воздействия на объект достигают больших значений. На серийно освоенных промышленных механизмах отклонение средней эквивалентной скорости от расчетной достигает $\pm(20-50)\%$, а отклонение минимального перемещения составляет 0,3—1,2% полного хода при длительности управляющего импульса близкой к 0,2 с. Но самым существенным выводом работы [92] является сравнение обоих способов управления по надежности: если какой-то исполнитель-

ный механизм в импульсном режиме имеет вероятность безотказной работы при $t = 2000$ ч $P = 0,9$, то этот же механизм в режиме работы с переменной скоростью будет обладать вероятностью безотказной работы $P' = 0,99$, или если нужен исполнительный механизм переменной скорости с вероятностью безотказной работы при $t = 2000$ ч $P' = 0,9$, то достаточно его построить на элементах исполнительного механизма, имеющего в импульсном режиме вероятность безотказной работы $P = 0,68$. Повышение вероятности отказов (значительную роль здесь играют неблагоприятные режимы редуктора) с 0,1 до 0,32, т. е. в 3,2 раза, достаточно иллюстрирует важность правильного решения этого вопроса. В целом для объектов, у которых кратковременные циклические включения функционально необходимы, введение повторно-кратковременного включения — вполне естественное решение. Однако введение специального способа управления и установление различных соотношений интервалов включения и выключения привода для соответствующего снижения средней скорости требуют тщательного обоснования как с точки зрения выбора частоты вращения приводного двигателя и передаточного числа редуктора, так и учета резкого повышения интенсивности отказов при импульсном характере нагрузки. Представляется целесообразным при этом использовать широко известную систему с нелинейной гибкой обратной связью. Начиная с работы [44] при анализе электропривода, сочетающего высокие скоростные свойства с точной остановкой в заданной точке, обычно приводят данные о принципе управления, использующем непрерывное сравнение величины, пропорциональной квадрату текущего значения скорости v перемещения рабочего органа (например, вала прокатного стана), с величиной, пропорциональной перемещению, остающемуся до точной остановки, т. е. остающемуся рассогласованию δ . Электрическая мощность, подаваемая на двигатель,

$$P = k_1 \delta - k_2 v^2.$$

Впервые этот принцип был предложен и теоретически обоснован как для релейных, так и для непрерывных систем Д. И. Марьяновским и автором [44]. Практически этот принцип был осуществлен в 1935—1936 гг. на мостовом следящем устройстве для автоматизации нажимных устройств стана 500 Днепродзержинского металлургического завода им. Дзержинского. В [98] подчеркивается отечественный приоритет этого предложения и использования вообще нелинейной гибкой обратной связи на 11 лет раньше первого упоминания о такой обратной связи в зарубежной литературе. Точная перестановка вала за время, не превышающее времени выполнения операции лучшего оператора, была достигнута именно благодаря применению этого принципа регулирования. В трудах, вышедших в последние годы (например, в [93]), именно этот режим движения принимается оптимальным, причем

настолько бесспорным, что уже не дается никаких ссылок на первоисточник.

Физические обоснования указанного принципа регулирования весьма наглядны: каждый конкретный приводной двигатель при данной нагрузке имеет предельную крутизну разгона (например, участок 1 кривой $v = f(t)$ на рис. 1.5), некоторую наибольшую установившуюся скорость (участок 2) и предельную крутизну торможения (участок 3). Для небольших перемещений графиком функции $v = f(t)$ служит участок 1 до точки a и участок 3', показанный на рис. 1.5 пунктиром.

Для того чтобы иметь наименьшее для данного привода время перемещения, необходимо дать импульс для перевода на заданное предельное торможение в той точке процесса (a или b), где площадь треугольника $ac'q'$ (или bcq), соответствующая углу, который пройдет управляемая ось при торможении, равна рассогласованию между управляемой и управляющей осями, т. е. перемещению, которое нужно пройти управляемой оси.

Но площадь $ac'q'$ (или bcq) пропорциональна v_a^2 (или v_b^2). Поэтому на любом участке слежения нужно иметь возможность сравнивать возникающее в диагонали моста напряжение, линейно зависящее только от рассогласования, с напряжением, создаваемым, например, квадратичным тахогенератором, связанным с осью привода. Можно также сравнивать напряжение, пропорциональное корню квадратному из рассогласования, с напряжением, линейно зависящим от скорости привода. В гл. 4 приводится решение задачи ведения процесса с ограниченным сверху абсолютным значением ускорения — во всех этих случаях выявляются динамические преимущества безредукторного электропривода.

В отечественной литературе имеется достаточное количество добротных трудов по электроприводу, например [21], [35], [57], [93], [99], где анализируются аналогичные воздействия принципов управления электроприводом на вид и характеристики элементов системы управления, а также анализируются переходные процессы с учетом нелинейности и упругости связей, корректирующих устройств, характера возмущения и т. п.

Нам представляется нецелесообразным, исходя из направленности и объема данной книги, сколько-нибудь подробно останавливаться на общем анализе этих вопросов. Здесь хотелось бы только подчеркнуть, что выбор способа управления электроприводом определяющим образом влияет на тип основных элементов системы управления и что при выборе способа управления необходимо учитывать электропривод в целом, в том числе обязательно и редуктор.

1.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕДУКТОРНОГО И БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Разберем еще одно, кажущееся с первого взгляда неоспоримым преимущество привода с высокоскоростным электродвигателем и редуктором перед безредукторным электроприводом. Низкоскоростные двигатели малой и средней мощности имеют КПД порядка 0,1—0,15 и 0,4—0,5 соответственно, тогда как высокоскоростные электродвигатели тех же порядков мощности имеют КПД соответственно 0,25—0,4 и 0,8—0,9, что примерно вдвое выше. Но и здесь более подробный анализ позволяет существенно скорректировать полученные соотношения, так как в случае редукторного электропривода нужно учесть еще и КПД редуктора. Принято считать, что КПД редуктора достаточно высок, но это справедливо лишь для достаточно сложных и дорогих передач.

Для наиболее простых и относительно дешевых передач, например передачи винт-гайка, это не так. В [58] приводятся характерные кривые (рис. 1.6) зависимости КПД передачи η от угла подъема резьбы ψ в рад. Из кривой 1, соответствующей обычной винтовой передаче, видно, что, например, при угле подъема резьбы в $5,75^\circ$ (0,1 рад) $\eta = 0,2$. Следует отметить, что, поскольку мощность на выходе передачи $P_2 = P_1 \eta$, скорость на выходе $v_2 = h/t_1$; скорость на входе $v_1 = \pi D/t_1$, где h — шаг резьбы; t_1 — время одного оборота, то в установившемся режиме

$$F_2 \frac{h}{t_1} = F_1 \frac{\pi D}{t_1} \eta. \quad (1.21)$$

Но $h = \pi D \sin \psi \approx \pi D \psi$, где D — диаметр делительной окружности; отношение линейных скоростей $K_v = 1/\psi$, а интересующее нас отношение

$$K_F = F_2/F_1 = h/\psi. \quad (1.22)$$

Для угла $\psi = 0,1$ рад $K_F = 2$ (невысокое). В точке примерного максимума имеем $K_F = 3$, но при этом $\eta < 0,1$; невысокие результаты получаются и при использовании винтовой передачи особенно тщательного (по восьмому-девятому классу) изготовления, соответственно более трудоемкого и дорогого (кривая 2 на рис. 1.6). Но и здесь получаем в точке максимума $K_F \approx 5$; $\eta \leq 0,15$, а более или менее приемлемые значения $\eta = 0,4 \div 0,45$ лишь при $\psi \approx 0,16$ рад, когда $K_v \approx 6$, а $K_F = hK_v \approx 2,5$.

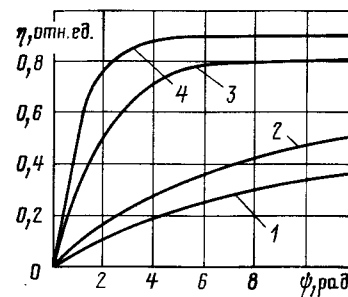


Рис. 1.6. Зависимость КПД винтовой передачи от угла подъема резьбы

Кривые 3 и 4 (рис. 1.6) соответствуют данным специальных винтовых передач с встроенными шариковыми устройствами. Только для этих передач удается достичь $\eta = 0,65 \div 0,85$ при $K_F = 8 \div 10$, т. е. $K_F = 6 \div 8$. Существенное снижение КПД при возрастании передаточного числа подтверждает и табл. 1.6 по червячным редукторам. Следует указать, что поскольку мощность учтена на быстроходном валу, то на тихоходном выходном валу имеем $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \eta$ и, например, для редуктора РЧУ-40 при передаточном числе 64 имеем $P_{\text{вх}} = 0,1$ кВт и $\eta = 0,43$, т. е. $P_{\text{вых}} = 0,043$ кВт, что при $m_{\text{ред}} = 6,5$ кг дает $m'_{\text{ред}} = 146$ кг/кВт. В [42] приводятся данные, позволяющие считать, что высокие значения удельных масс имеют и мощные редукторы, в том числе и цилиндрические. Так, у редуктора РМ 1000Б с передаточным числом $i = 48,57$ при мощности 34,5 кВт на быстроходном валу (здесь это не имеет особого значения ввиду высокого значения КПД), который имеет массу 2065 кг, т. е. $m'_p \approx 60$ кг/кВт; при $\omega = 2\pi n/60 = 157$ рад/с. Это соответствует $m'' = m'\omega \approx 9400$ кг/кН·м, что в несколько раз больше аналогичных показателей электродвигателей соответствующего порядка мощности и частоты вращения. Однако огромное количество промышленных приводов работает все же с хорошо отработанными, не слишком дешевыми, но и не чрезмерно дорогими редукторами с $\eta_{\text{ред}} = 0,9 \div 0,95$, и КПД таких редукторных приводов $\eta_{\text{ред. пр}} = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{ред}} \approx 0,9 \cdot 0,92 = 0,83$, что значительно больше, чем КПД безредукторных приводов, $\eta_{\text{безр. пр}} = 0,3 \div 0,4$. При существенном снижении выходной скорости привода эта разность еще возрастает. КПД редукторного привода снижается при добавлении еще одной шестеренной пары на сотые доли, а КПД безредукторного привода — на десятые доли, доходя при весьма малых скоростях до долей процента. Ниже будут изложены соображения о принципиальных возможностях существенного повышения КПД низкоскоростного электродвигателя, но сначала установим действительную роль расчетного КПД в энергетических показателях эксплуатации привода. Как известно, табличное значение КПД имеет место лишь для одной какой-нибудь нагрузки, например номинальной, а чаще для так называемой оптимальной нагрузки $\beta_{\text{опт}}$, при которой КПД имеет максимальное значение. У обычной электромашины (в том числе и у трансформатора) $\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_0 / P_{\text{м.н}}}$, где P_0 — потери холостого хода, а $P_{\text{м.н}}$ — потери в меди при номинальной нагрузке, но лишь малая доля приводов работает непрерывно с одной и той же нагрузкой. При минимизации потерь у приводов и у приводных электродвигателей возникает та же проблема, которая уже давно в классических трудах Доливо-Добровольского и Видмара была сформулирована для трансформаторов, — учет реального распределения нагрузки. Для потребителя важно получение минимума потерь не на испытательном стенде завода-изготовителя, а за типичный период эксплуатации, например за год. Отсюда возникло понятие «годовой КПД»:

$$\eta_T = \frac{\int_0^T P_2 dt}{\int_0^T P_1 dt}, \quad (1.23)$$

где T — длительность периода (например, год); P_2 — полезная мощность; P_1 — потребляемая мощность.

Потери при любом коэффициенте нагрузки $\beta = I/I_n$ определяются согласно выражению $\Delta P = P_0 + \beta^2 P_{\text{м.н}}$, но $P_{\text{м.н}} = P_0 / \beta_{\text{опт}}^2$, т. е.

$$\Delta P = P_0 \left[1 + \left(\frac{\beta}{\beta_{\text{опт}}} \right)^2 \right]. \quad (1.24)$$

При $\beta = \beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_0 / P_{\text{м.н}}}$ имеет место не минимум потерь, а максимум КПД, соответствующий минимуму отношения

$$\frac{\Delta P}{P_2} = \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{м.н}}}{\beta P_{\text{ном}}}.$$

Но нас интересует именно минимум годовых потерь Ψ при заданном распределении $\beta(t)$ в течение $T = 8760$ ч = 1 год [69].

Значит, надо минимизировать следующее выражение:

$$\Psi = \int_0^T P_0 dt + \int_0^T P_0 \frac{\beta^2(t)}{\beta_{\text{опт}}^2} dt. \quad (1.25)$$

При заданных P_0 и $\beta_{\text{опт}}$ задача становится тривиальной и сводится

к минимизации интеграла $\int_0^T \beta^2(t) dt$. Минимальное значение этого

интеграла соответствует такому распределению нагрузки, при котором потери в меди минимальны. Это соответствует случаю, когда нет тока нагрузки и β тождественно равно нулю. При задании только η_{max} (или $\eta_{\text{ном}}$) минимизации интегральных потерь Ψ задача приобретает реальный смысл: найти такое $\beta_{\text{опт}}$ при заданном распределении $\beta(t)$, при котором Ψ минимально. Для этого выразим P_0 через η_{max} , $P_{\text{ном}}$ и $\beta_{\text{опт}}$:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{опт}} + 2P_0} = \frac{\beta_{\text{опт}} P_{\text{ном}}}{\beta_{\text{опт}} P_{\text{ном}} + 2P_0}; \quad \beta_{\text{опт}} P_{\text{ном}} \eta_{\text{м}} + 2P_0 \eta_{\text{max}} = \beta_{\text{опт}} P_{\text{ном}};$$

$$P_0 = \frac{\beta_{\text{опт}} P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{м}})}{2\eta_{\text{max}}}.$$

Тогда

$$\Psi = \frac{P_{\text{ном}}}{2\eta_{\text{мах}}} \left(\int_0^T \beta_{\text{опт}} (1 - \eta_{\text{мах}}) dt + \int_0^T \frac{\beta^2(t) (1 - \eta_{\text{мах}})}{\beta_{\text{опт}}} dt \right), \quad \text{или}$$

$$\Psi = \frac{P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{мах}})}{2\eta_{\text{мах}}} \left(\beta_{\text{опт}} T + \int_0^T \frac{\beta^2(t)}{\beta_{\text{опт}}} dt \right), \quad (1.26)$$

где $\beta^2(t)$ не зависит от $\beta_{\text{опт}}$; $\beta_{\text{опт}}$ не зависит от t .
Минимизируем годовые потери по выражению

$$\frac{d\Psi}{d\beta_{\text{опт}}} = \frac{P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{мах}})}{2\eta_{\text{мах}}} \left(T + \frac{\partial}{\partial \beta_{\text{опт}}} \int_0^T \frac{1}{\beta_{\text{опт}}} \beta^2(t) dt \right) = 0.$$

Отсюда

$$T - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} \int_0^T \beta^2(t) dt = 0.$$

Так, при $\beta(t) = 1$ имеем $T - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} T = 0$, $\beta_{\text{опт}}^2 = 1$, $\beta_{\text{опт}} = 1$, что очевидно. При любом другом постоянном значении $\beta(t) = \beta_1$ имеем $T - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} \beta_1^2 T = 0$; $1 = \frac{\beta_1^2}{\beta_{\text{опт}}^2}$; $\beta_{\text{опт}} = \beta_1$. При $\beta = t/T$ (равновероятная нагрузка)

$$T - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} \int_0^T \frac{t^2}{dt} = 0; \quad T - \frac{T}{3\beta_{\text{опт}}^2} = 1; \quad \beta_{\text{опт}} = t\sqrt{1/3} = 0,58t.$$

При дискретном распределении имеем

$$T - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} \sum \beta_i^2 t_i = 0, \quad \text{или} \quad T = \frac{T}{\beta_{\text{опт}}^2} \sum \beta_i^2 F_i = 0;$$

$$1 - \frac{1}{\beta_{\text{опт}}^2} \sum \beta_i^2 F_i = 0; \quad 1 = \frac{\sum \beta_i^2 F_i}{\beta_{\text{опт}}^2};$$

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\sum \beta_i^2 F_i}.$$

При заданном $\beta_{\text{опт}}$ имеем заданное соотношение P_0 и $P_{\text{м.н}}$; суммарные годовые потери в меди составляют $\sum \beta_i F_i P_{\text{м.н}}$, значит, возможным сдвигом $\beta_{\text{мах}}$ приблизить значение $\sqrt{\sum \beta_i^2 F_i}$ к оптимальному.

Конструктор обычной электрической машины или трансформатора для обеспечения требуемого соотношения $P_0/P_{\text{м.н}}$ варьирует отношение меди и стали в машине. У низкоскоростной машины безредукторного электропривода, как правило, нет возможности изменять (уменьшать), например, высоту спинки статора, чтобы увеличить потери P_0 , которые у таких машин много меньше потери $P_{\text{м.н}}$, так как этот размер уже лимитируется конструктивными соображениями. Оптимизация соотношения потерь теряет смысл — возникает прямая задача минимизации потерь холостого хода (это уже в основном потери на возбуждение, на трение, на вентиляцию); оставляем на эти потери до 7% подведенной мощности. Рассмотрим частный КПД $\eta_a = P_2/(P_2 + P_{\text{м}})$ и будем считать общий КПД низкоскоростного двигателя $\eta = \eta_a - 0,07$.

Потери в меди, например, для двигателя постоянного тока

$$P_{\text{м}} = I^2 R = 2ai_a^2 P_{\text{пр}} N / 2a = i_a^2 R_{\text{пр}} N, \quad (1.27)$$

где $R_{\text{пр}} = \varrho_{\text{гор}} \frac{l_{\text{м}} + l_{\text{л.ч}}}{S_{\text{п}}}$; $\varrho_{\text{гор}}$ — удельное сопротивление материала в нагретом состоянии машины; $l_{\text{м}}$ — активная длина; $l_{\text{л.ч}}$ — длина лобовой части; $S_{\text{п}}$ — сечение провода. Например, для меди $\varrho_{\text{гор}} \approx 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}/\text{мм}^2$ при обычных температурах нагрева; для алюминия $\varrho_{\text{гор}} \approx 0,04 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}/\text{мм}^2$. Для оценочного расчета можно принять

$$l_{\text{л.ч}} = 1,5l_{\text{м}} \text{ и } R_{\text{пр}} = \varrho_{\text{гор}} k_{\text{л.ч}} l_{\text{м}} / S_{\text{пр}},$$

где $k_{\text{л.ч}} = (l_{\text{м}} + l_{\text{л.ч}}) / l_{\text{м}} \approx 2,5$.

При расчете учитываются только потери в меди, следовательно,

$$E = \eta_a U \text{ и } IR = (1 - \eta_a) U, \quad \frac{IR}{E} = \frac{i_a R_{\text{пр}} N / 2a}{B_{\text{ср}} l_{\text{в}} N / 2a} = \frac{1 - \eta_a}{\eta_a}.$$

Если учесть, что $i_a = jS_{\text{п}}$, то $\frac{1 - \eta_a}{\eta_a} = \frac{jk_{\text{л.ч}} \varrho_{\text{гор}}}{B_{\text{ср}} v}$, или

$$\eta_a = \frac{B_{\text{ср}} v}{jk_{\text{л.ч}} \varrho_{\text{гор}} + B_{\text{ср}} v}. \quad (1.28)$$

Например, для $B_{\text{ср}} = 0,6 \text{ Тл}$; $v = 0,1 \text{ м/с}$; $k_{\text{л.ч}} = 2,5$ и $\varrho_{\text{гор}} = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}/\text{мм}^2$ для часто принимаемых $j = 6 \text{ А/мм}^2$ $\eta_a = \frac{0,06}{0,3 + 0,06} = 0,167 \approx 0,17$.

Потери холостого хода ΔP_0 сравнительно невелики, но если они все же составляют около 5—7% потребляемой мощности, то полный КПД $\eta = 0,1 \div 0,12$. При $v = 0,25 \text{ м/с}$ можно было бы получить $\eta_a \leq 0,33$ и $\eta \approx 0,25$.

Формулу (1.28) удобно представить [42] в виде

$$j = \frac{1-\eta_a}{\eta_a} \frac{B_{cp} v}{k_{л.ч} \varrho_{гор}}, \quad (1.29)$$

или, учитывая возможность варьирования как плотностью тока j , так и значением средней индукции в зазоре B_{cp} ,

$$j/B_{cp} = \frac{1-\eta_a}{\eta_a} \frac{v}{k_{л.ч} \varrho_{гор}}. \quad (1.30)$$

Для меди с $\varrho_{гор} = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1} / \text{мм}^2$ и принятого отношения полной длины витка к длине его активной части $k_{л.ч} \approx 2,5$ (отметим, что этот коэффициент уменьшается с ростом числа полюсов и уменьшением частоты вращения машины) имеем весьма простое соотношение

$$j/B_{cp} = 20v(1-\eta_a)/\eta_a. \quad (1.31)$$

Задавшись, например, для эскалатора метро при $v = 1 \text{ м/с}$ вполне приемлемым КПД $\eta_a = 0,8$ (с учетом остальных потерь $\eta \approx 0,73$), получили бы $j/B_{cp} = 5$, т. е. при вполне достижимом у машины относительно небольшом зазоре $B_{cp} = 0,4 \text{ Тл}$ для $\eta \approx 0,73 \div 0,75$ потребовалась бы плотность тока в обмотках 2 А/мм^2 , соответственно для алюминиевой обмотки $\varrho_{гор} \approx 0,04 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1} / \text{мм}^2$, и (1.31) примет вид

$$j/B_{cp} = 10v(1-\eta_a)/\eta_a. \quad (1.32)$$

Указанным параметрам для электродвигателя безредукторного привода эскалатора метро при этом соответствовала бы плотность тока в алюминиевой обмотке $j = 1 \text{ А/мм}^2$. Еще одно последнее преобразование, и можно будет сделать существенный вывод в отношении энергетических показателей низкоскоростных электродвигателей. Перепишем (1.32) в виде

$$\frac{Aj}{AB_{cp}} = v \frac{1-\eta_a}{\eta_a} \frac{1}{k_{л.ч} \varrho_{гор}}, \quad (1.33)$$

$$\text{или } Aj = Kv \frac{1-\eta_a}{\eta_a} F', \quad (1.34)$$

где $K = \frac{1}{k_{л.ч} \varrho_{гор}}$; Aj — фактор нагрева в его привычных, хотя и несколько отличающихся от предписанных системой СИ значениях (A — в А/м , j — в А/мм^2).

При одинаковых плотностях усилий на поверхности ротора одинаковом отношении активной части витка к его полной длине и том же материале обмотки и равном нагреве для сохранения одного и того же значения КПД меньшим значениям линейной скорости на поверхности якоря должны соответствовать во столько же раз меньшие значения фактора нагрева.

На рис. 1.7 показана для нескольких значений КПД зависимость $Aj [\text{А}^2 / (\text{мм}^2 \cdot \text{м})]$ от скорости v при удельном усилии, характерном для обычных машин, $F' = 3 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ и на рис. 1.8 показана

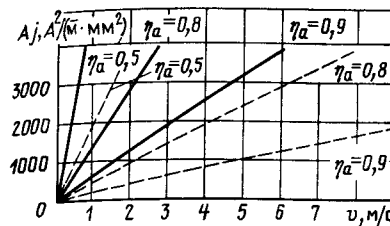


Рис. 1.7. Зависимость фактора нагрева от скорости, требующаяся для сохранения одного и того же значения КПД: — при $F' = 3 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; ---- при $F' = 1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$

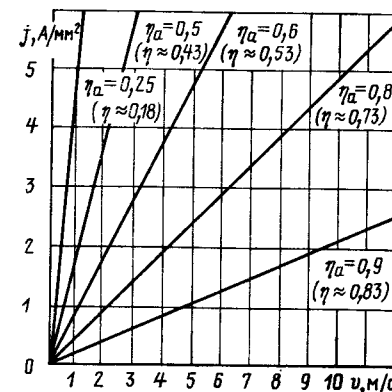


Рис. 1.8. Зависимость плотности тока от скорости

зависимость плотности тока $j (\text{А/мм}^2)$ при средней индукции в зазоре $B_{cp} = 0,4 \text{ Тл}$ и $F' = 1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, характерном для линейных машин. В обоих случаях предполагается медная обмотка и $K = 1/k_{л.ч} \varrho_{гор} = 20$.

Из рассмотрения выведенных формул и графиков видно, что у низкоскоростных машин для сохранения высокого КПД нужно увеличивать массу обмотки. Увеличение массы обмотки достаточно весомый фактор, который должен был бы снизить эффективность применения безредукторного электропривода либо из-за возрастания капитальных затрат (на обмотку), либо из-за роста эксплуатационных затрат при низком КПД.

Более детальное рассмотрение вопроса позволяет существенно смягчить этот вывод. Во-первых, меньший фактор нагрева или меньшая плотность тока приводит к меньшему фактическому нагреву обмотки. Это уменьшает значение $\varrho_{гор}$ и увеличивает соответствующий заданному КПД при данной скорости фактор нагрева (плотность тока). Следовательно, уменьшается требуемая масса обмотки. Во-вторых, самым важным является то обстоятельство, что резкое снижение нагрева обмотки существенным образом повышает ее надежность и долговечность.

Известно из [66] и [96], что, например, в машинах постоянного тока доля отказов, возникающих в обмотке якоря, составляет около 80%, в коллекторе — около 11% и в остальных элементах только примерно 9%. При снижении температуры перегрева на $20-30^\circ \text{С}$ (что вполне реально даже при снижении плотности тока только вдвое) можно получить в 6—8 раз меньшую интенсивность отказов в обмотках. Можно также снизить интенсивность отказов коллекторного узла благодаря уменьшению скорости и улучшения коммутации примерно вдвое.

Даже если считать, что у остальных элементов по причинам, изложенным в предыдущем параграфе, удвоится интенсивность

УСТРОЙСТВА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИЕЙ

2.1. МНОГОПОЛЮСНЫЕ МАШИНЫ

Естественным способом снижения частоты вращения ротора электродвигателя является увеличение числа пар полюсов p . Действительно, при одной и той же частоте f питающего напряжения синхронная частота вращения машин переменного тока

$$n = 60f/p. \quad (2.1)$$

У двигателя постоянного тока, например, при параллельном или независимом возбуждении частота вращения холостого хода

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} = \frac{U \cdot 60a}{pN\Phi} = \frac{K}{p}, \quad (2.2)$$

т. е. при заданном напряжении U , числе пар параллельных ветвей a , числе проводов N и магнитном потоке Φ частота вращения ротора обратно пропорциональна числу пар полюсов p . Снижение быстроходности двигателей, как уже указывалось выше, ухудшает их массогабаритные и энергетические показатели. Однако стремление уменьшить передаточное число редуктора или (в отдельных случаях) полностью его исключить привело к тому, что в практике электромашиностроения имеет место довольно широкий набор машин с различными значениями номинальной частоты вращения ротора. Большой диапазон частот вращения и наименьшее их значение у серийно выпускаемых машин для промышленного электропривода имеет место у двигателей постоянного тока. Это положение можно проиллюстрировать табл. 2.1, где $n_{\min} = 32$ об/мин и $n_{\max} = 1000$ об/мин. Приведены данные по двигателям одного и того же типа и близких значений мощностей. В целом, диапазон частот вращения машин постоянного тока еще шире — до десятков тысяч оборотов в минуту. Синхронная машина, чтобы при промышленной частоте иметь частоту вращения 30 об/м, должна иметь 200 полюсов.

Таблица 2.1. Двигатели постоянного тока

Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	n , об/мин	КПД, %	Момент инерции, кг·м ²	M , кН·м	Масса, т	m' , кг/кВт	m'' , кг/(кН·м)	$T_{эм}$, сек
МП4000-32У4	4000	930	32	90	$60 \cdot 10^3$	1190,5	190	47,5	159,6	0,17
МП6300-63У4	6300	930	63	94	$42,5 \cdot 10^3$	951,7	182	28,9	191,3	0,30
МП7100-125	7100	930	125	95,4	$42,5 \cdot 10^3$	537,9	111,8	15,75	207,9	1,04
МП1000-315У4	1000	440	315	—	$0,45 \cdot 10^3$	30,3	13	13,0	423	0,49
МПП-1000МЗ	1000	600	1000	94,4	115	9,5	6,25	6,25	656	1,27

отказов (не считая тех отказов, которые возникают в редукторе), можно грубо оценить, что общая продолжительность безотказной работы увеличится в $\frac{100}{80/8 + 11/2 + 9 \cdot 2}$ раз, т. е. примерно в 3 раза. Если считать, что ущерб от отказа вызван только ценой заменяемого элемента (дополнительные составляющие ущерба — расходы на рабочую силу, стоимость недоданной продукции за время восстановления и т. п. — примем равными остаточной стоимости отказавшего элемента — ведь и сгоревшая обмотка немало стоит. Тогда получаем, что в 3 раза реже заменяемая за значительное время эксплуатации обмотка вдвое большей стоимости (соответственно удвоенному количеству проводникового материала) обходится народному хозяйству в 1,5 раза дешевле. Наконец, резкое снижение перегрева позволяет отказаться от зачастую громоздких испарительных и других охлаждающих систем, включаемых в состав электропривода и при использовании машин со значительными плотностями токов в обмотках.

Конечно, приведенное сравнение никак не претендует на количественную точность — его задача показать, что, кроме повышения КПД, снижение плотности тока у низкоскоростных машин имеет еще ряд положительных сторон.

Мы разбирали выше задачи сохранения высокого значения КПД при меньшей скорости путем повышения массы обмотки. В [94] указывается, что некоторые зарубежные фирмы уже идут по этому пути. Но в действительности оптимальные решения этого вопроса, существенно выходящие за рамки оценки возможностей безредукторных приводов в этой книге, еще ждут совместных исследований электротехников и экономистов.

Повышение КПД у электропривода означает, что для выполнения того же необходимого объема работы потребуется меньше электроэнергии, а это означает кроме уменьшения количества устройств генерирования системы энергоснабжения еще и эквивалентное уменьшение количества активных, в том числе проводниковых, материалов у машин, вырабатывающих и преобразующих электроэнергию во всей указанной системе. Полный ответ на вопрос эффективности повышения КПД путем увеличения массы обмотки электродвигателя должен был бы, по-видимому, кроме уже высказанных выше соображений, учесть и результаты таких исследований. Пока же приходится ограничиться известными методами расчета по приведенным расходам, где в соответствующих капитальных затратах должна быть учтена требуемая стоимость обмотки, а в составляющей эксплуатационных расходов — потребление энергии, зависящее от КПД. Наряду с этим заслуживают особого внимания машины, где задача получения высоких значений КПД при низких скоростях решается по-новому, — это машины двойного движения, рассматриваемые в гл. 4.

Для довольно тихоходной машины МП4000-32У4 удельная масса $m' = 47,5$ кг/кВт не слишком велика, достигнут высокий для этой частоты вращения КПД $\eta = 0,9$, машина хорошо использована по электромагнитным параметрам, на что указывает меньшее значение удельной массы $m'' = 159$ кг/(кН·м) и самое низкое значение электромеханической постоянной времени $T_m = 0,17$ с. Удельная масса m'' растет с ростом частоты вращения, отношение удельных масс двигателей с $n = 1000$ об/мин и $n = 32$ об/мин $m''/m' = 656/159,6 = 4,11$ не слишком отличается от $\sqrt{1000/32} = 5,6$.

В ряде случаев даже снижение передаточного числа редуктора путем использования тихоходного двигателя дает существенный положительный эффект. В качестве иллюстрации используем данные о модификации привода мельницы одного из горно-обогатительных комбинатов. На рис. 2.1 показана типовая схема привода мельницы с относительно быстроходным синхронным двигателем ($n = 1000$ об/мин). Основные данные, относящиеся к этому приводу, приведены в гл. 1. Здесь рассмотрим результаты модификации этого привода, заключающейся в замене 6-полюсного двигателя 48-полюсным. Существенно снизилась суммарная масса привода (без имеющей место в обоих вариантах оконечной пары) с $m \approx 46$ т до $m \approx 28$ т (примерно в 1,64 раза). Возросла надежность, резко снизился шум, хотя последнее звено механической передачи ($i = 125:13$) осталось.

Для создания полностью безредукторного привода мельницы с $n \approx 13$ об/мин разработана система с синхронным двигателем типа СДТН-6300-60У4; пуск двигателя — частотный, число полюсов $2p = 60$.

При питании от сети промышленной частоты 60-полюсный двигатель обеспечивал бы $n = 100$ об/мин. Чтобы получить $n = 12,5$ об/мин, нужно этот двигатель питать от преобразователя с частотой $f = 6,25$ Гц, либо для получения $n = 13,2$ об/мин — с частотой $f = 6,6$ Гц. При питании от сети с частотой $f = 50$ Гц нужно было бы иметь (для $n = 12,5$ об/мин) $2p = 240$. Стоимость такой машины, по-видимому, не уступала бы суммарной стоимости

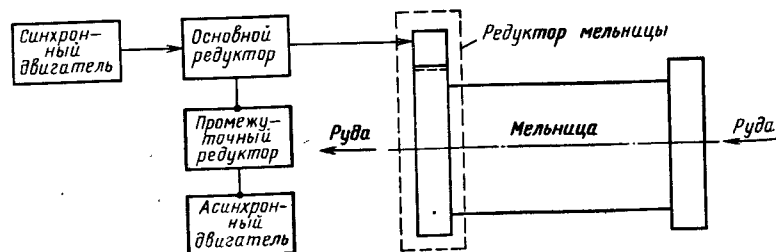


Рис. 2.1. Типовая схема привода мельницы

элементов типовой схемы. Впрочем, стоимость преобразователей и их габаритные размеры пока еще существенно превышают соответствующие показатели электрических машин — за отсутствие редуктора здесь приходится немало платить. Тем не менее указанная система представляется достаточно перспективной, особенно для приводов со значительным изменением частоты вращения выходного вала, с затрудненным пуском, — в этом случае альтернативой синхронному двигателю с преобразователем частоты явился бы низкоскоростной двигатель постоянного тока соответствующей мощности с устройствами пуска. Сам по себе низкоскоростной двигатель постоянного тока равной мощности с СДТН-6300-60У4 имеет существенно меньшее число полюсов. Так, двигатель МП6300-32У4 (индивидуальный привод валков прокатного стана) имеет $2p = 22$ (против 60 у СДТН), причем частота вращения его ротора втрое меньше (32 об/мин против 100 об/мин у СДТН при питании его от сети с частотой 50 Гц).

Быстродействие привода, малое время реверса, высокое отношение развиваемого приводом момента к моменту инерции решающим образом влияют на производительность и эффективность действия таких ответственных объектов, как главные приводы различных реверсивных прокатных станов и летучих ножиц в металлургической промышленности, приводов поворота шагающих экскаваторов в горнорудной промышленности, судовых (особенно ледокольных) электроприводов и др.

Для создания таких приводов (обычно безредукторных) электротехническая промышленность выпускает весьма совершенные многополюсные двигатели постоянного тока. Благодаря использованию новых изоляционных материалов, применению в магнитных цепях машины лучших электротехнических сталей, более совершенных схем обмоток якоря, улучшенной коммутации с использованием новых типов коллекторных щеток удалось за последние четверть века вдвое поднять отношение номинального вращающего момента к маховому у прокатных двигателей [10]. Но возможности дальнейшего улучшения показателей таких машин традиционной конструкции ограничены.

Электромашиностроители ищут новые пути — об одном из таких, весьма перспективных решений группа советских ученых докладывала в 1977 г. на Всемирном электротехническом конгрессе [10]. Рассматривалась машина с возбуждением от сверхпроводящих катушек, обеспечивающих в зоне обмотки якоря (выполняемой вне криостата, из обычной меди) магнитное поле с индукцией в 1,5—2,5 Тл. При этом можно отказаться от использования ферромагнитных материалов в якоре двигателя и заменить эти материалы более легкими и более прочными, например титановым листом или стеклопластиком. Наиболее приемлемым решением для создания сверхпроводящего двигателя с малоинерционным ротором для реверсивных электроприводов можно считать исполне-

ние двигателя с неподвижной системой сверхпроводящих катушек возбуждения и вращающимся якорем. Применение системы возбуждения со сверхпроводящими катушками позволяет увеличить при тех же габаритных размерах якоря вращающий момент двигателя практически в 1,5—2 раза по сравнению с электродвигателями обычного исполнения. При замене электротехнической стали в сердечнике якоря листовым титаном, плотность которого почти в 2 раза меньше плотности стали, а механическая прочность значительно выше, представляется возможным снизить момент инерции якоря двигателя со сверхпроводящей системой возбуждения в 2—3 раза по сравнению с двигателем обычного исполнения.

Применение безредукторных главных приводов реверсивных прокатных станов — показательный пример преодоления ударной нагрузки, которая при использовании механического редуктора приводила к срезу зубьев и требовала весьма значительного коэффициента запаса при изготовлении редуктора, увеличивая его массу и повышая стоимость изготовления. Для ударных нагрузок, как правило, и в настоящее время все чаще применяется безредукторный электропривод. Характерным примером такой тенденции является, например, переход у новой серии блюмингов от редукторного привода линейки манипулятора к безредукторному, разработанному ведущим институтом в этой области. Весьма характерно сравнение динамических показателей приводов: результирующий момент инерции безредукторного привода, приведенный к рабочему валу механизма, снизился в 16 раз; запас кинетической энергии, который создает удар зубьев шестерни по зубьям рейки (преобразующий вращательное движение выходного вала привода с $n=35$ об/мин в поступательное движение линейки со скоростью $v=1,4$ м/с) снизился примерно в 14 раз; время разгона у безредукторного привода уменьшилось в 3,7 раза, что существенно повысило производительность. В качестве приводного двигателя используется двигатель типа П2-630-204 мощностью 630 кВт при $n_{\text{ном}}=35$ об/мин. Возможно использование и несколько более мощного двигателя, который при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}=750$ В имеет мощность $P_{\text{ном}}=800$ кВт и частоту вращения $n=40$ об/мин. При несколько пониженном напряжении $U=600$ В частота вращения двигателя снижается до требуемых $n=35$ об/мин с соответствующим снижением мощности.

Этот способ использования машины постоянного тока для тихоходного (в частности, безредукторного) привода путем снижения реально используемой частоты вращения ротора за счет снижения подаваемого на якорь напряжения используется и в более широких пределах. Так, для наиболее подверженных ударам при захвате слитка вальками роликов рольгангов, расположенных между вальками («станинных роликов»), у которых редуктор быстро выходит из строя, в качестве тихоходного привода с $n=100 \div 115$ об/мин применен двигатель с $n_{\text{ном}}=500$ об/мин при $U_{\text{ном}}=440$ В, но

качестве рабочего напряжения выбрано $U=100$ В. В этом случае при той же номинальной нагрузке ($M_{\text{ном}}=3800$ Н·м) получено требуемое $n=115$ об/мин; удельная масса m' во столько же раз возросла (поскольку та же машина уже отдает мощность в $500/115=4,35$ раза меньше). При номинальных данных $m'_{\text{ном}}=4950/200=24,25$ кг/кВт; у реально используемого электродвигателя

$$P = P_{\text{ном}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} = 46 \text{ кВт} \text{ и } m' = 4950/46 = 108 \text{ кг/кВт}; \text{ снизился}$$

и КПД, но отнюдь не пропорционально реализуемой частоте вращения. Действительно, пусть при номинальных данных реализуется КПД $\eta_{\text{ном}} = 1 - \Sigma P / (U_{\text{ном}} I_{\text{ном}})$, т. е. имеют место суммарные потери

$$\Sigma P = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}). \quad (2.3)$$

Но при снижении напряжения U в рабочем режиме КПД равен

$$\eta = 1 - 0,5 \frac{\Sigma P}{UI_{\text{ном}}} - 0,5 \frac{\Sigma P}{UI_{\text{ном}}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} = 1 - 0,5 \frac{U_{\text{ном}}}{U} \left(1 + \frac{n}{n_{\text{ном}}}\right) \times \\ \times (1 - \eta_{\text{ном}}). \quad (2.4)$$

Здесь приняты допущения: о равенстве потерь в меди потерям холостого хода в номинальном режиме; о неизменности потерь в меди при изменении напряжения; о сохранении значений момента и тока; о снижении потерь холостого хода пропорционально снижению частоты вращения. Тогда, например, для рассматриваемого

случая при $\eta_{\text{ном}}=0,9$ имеем $\eta = 1 - 0,5 \cdot 4,4 \left(1 - \frac{115}{500}\right) (1 - 0,9) = 0,63$, т. е. при $n = 0,23 n_{\text{ном}}$ $\eta = 0,7 \eta_{\text{ном}}$.

В последнее время большое развитие получили моментные двигатели с малыми значениями T_m . Это достигнуто как за счет снижения отношения $J_a / M_{\text{пр}}$ (двигатели с полым ротором, с игольчатым ротором и аналогичные; системы с форсированием напряжения двигателя при разгоне и торможении и т. п.), так и за счет использования низкоскоростных, в ряде случаев безредукторных машин.

Одна из разработанных для этой цели машин имеет частоту вращения $n=500$ об/мин ($\omega_0=52 \text{ с}^{-1}$); $M_{\text{ном}}=7,85$ Н·м; мощность на валу $P_{\text{ном}} \approx 400$ Вт; массу (без вентилятора) $m=40$ кг, т. е. $m'=100$ кг/кВт, но зато момент инерции ротора $J_p=0,01 \text{ кг} \times \text{м}^2$ и при 6-кратном форсировании момента электромеханическая постоянная времени

$$T_m = 52 \frac{0,01}{6 \cdot 7,85} \approx 0,011 \text{ с.}$$

Добротность (при форсированном пуске) для таких машин порядка $D = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^2$ и более.

Аналогичная машина мощностью 0,19 кВт при $n=450$ об/мин ($\omega_0=47 \text{ 1/с}$; $M_{\text{ном}}=4,0$ Н·м; $M_{\text{пр}}=16$ Н·м; $m=18$ кг; $m' \approx$

≈ 95 кг/кВт) имеет момент инерции около $0,002$ кг·м² и, таким образом, $T'_m = 0,009$ с; $D \approx 8 \cdot 10^{-3}$ с². У таких двигателей малая и электромагнитная постоянная времени якоря $T'_a = L/R$, так как имеют место высокие значения насыщения стали якоря, что вместе с использованием большого числа полюсов снижает индуктивность, механическая характеристика практически линейная.

Фирма Inland (США) выпускает безредукторные моментные двигатели постоянного тока (Direct — Drive DC torque Motors [107]) с параметрами, приведенными в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Моментные двигатели фирмы Inland

Тип	n , об/мин	ω , рад/с	$\omega_{ном}$, рад/с	$M_{max} = M_{пр}$, Н·м	$M_{ном}$, Н·м	P_2 , кВт	J , кг·м ²	T'_m , мс	D_2 , с	m , кг	m' , кг/кВт
T2509	2100	220	110	0,2	0,096	0,011	$4,2 \cdot 10^{-5}$	45	5000	0,127	11,5
T4424	315	33,1	16,5	1,5	1,24	0,02	$76 \cdot 10^{-5}$	15	2000	0,540	27,0
T26001	17,2	1,8	0,9	4150	2160	1,95	36	16	115	616	376

Задачу снижения момента инерции ротора решают также предложенные в свое время автором бесконтактная синхронная машина [83] и коллекторная машина [84] с полым неферромагнитным токопроводящим ротором. Прототипом этих машин явилась известная бесконтактная синхронная машина с возбуждением от вращающегося трансформатора, близкая по типу к известным сельсином с кольцевым трансформатором [70]. Однако известные бесконтактные синхронные машины с возбуждением посредством кольцевого трансформатора имеют повышенное рассеяние обмотки и большое магнитное сопротивление на пути потока возбуждения из-за наличия воздушного зазора. Кроме того, они обладают существенным моментом инерции, что приводит к снижению быстродействия синхронных двигателей, увеличению времени реверсирования и т. д.

В рассматриваемой бесконтактной синхронной машине обмотка возбуждения установлена на полем каркасе ротора, размещенном между двумя магнитопроводами статора, и магнитопровод кольцевого трансформатора выполнен неподвижным. Кроме того, полый статор и магнитопроводы статора размещены внутри магнитопровода трансформатора. Конструктивная схема машины показана на рис. 2.2 (а — продольный разрез, б — полый ротор). Центральный 1, боковые 2, наружный 3 магнитопроводы образуют магнитную цепь трансформатора, внутри которой расположена первичная обмотка 4. Подвижная вторичная обмотка (виток) соединена с вращающимся выпрямителем 6, соединенным с обмоткой 7 возбуждения машины. Обмотка размещена на полем неэлектропроводном каркасе 8, который не обязателен, если достаточно жесткость обмотки 7, выполненной, например, в виде витка из широкой (60° по дуге) полоски высокоэлектропроводного

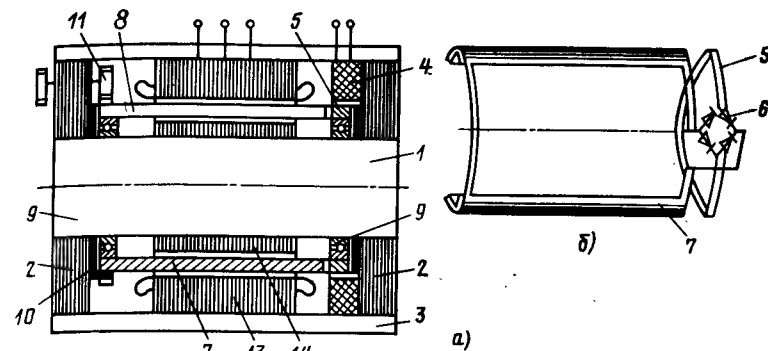


Рис. 2.2. Бесконтактная синхронная машина

материала. Каркас 8 установлен в подшипниках 9 на центральном магнитопроводе 1. Кольцевые части подшипников должны быть разрезными либо выполненными из неэлектропроводного материала. В одном из боковых магнитопроводов 2 выполнено отверстие для передачи вращения через шестерни 10 и 11.

На рис. 2.3 показан еще один вариант такой машины. Вторичная обмотка 5 трансформатора машины установлена на части полого каркаса, введенной в кольцевой трансформатор через зазор, выполненный в одном из боковых магнитопроводов 2. Магнитопровод 14 при этом может свободно вращаться на подшипниках 15. В данном варианте отсутствует необходимость выполнения разрезов в листах статора 13 и магнитопроводов 2 и 14. Остальные части машины обозначены так же, как на рис. 2.2.

Интересным вариантом этой машины является коллекторный двигатель [84], использующий принцип «вынесенного коллектора», предложенный автором в 1957 г. [72]. Но у двигателя по [72] в магнитной цепи ротора имелись дополнительные воздушные зазоры, что увеличивало необходимую намагничивающую силу обмотки возбуждения. Кроме того, ротор сложен по своей конструкции и обладает значительным моментом инерции.

Рассматриваемый ниже двигатель отличается тем, что обмотка возбуждения выполнена в виде витка, состоящего из плоских проводящих полосок, установленных в воздушном зазоре, и соединенного через вращающиеся выпрямители со вто-

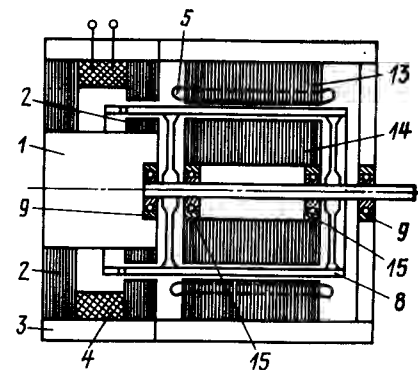


Рис. 2.3. Вариант бесконтактной синхронной машины

ричной обмоткой кольцевого трансформатора, выполненной в виде кольца, индуктивно связанного с неподвижной первичной обмоткой.

Такое выполнение двигателя позволяет обеспечить полную бесконтактность, снизить вес и момент инерции ротора, повысить надежность и уменьшить намагничивающий ток в неподвижной обмотке возбуждения.

Магнитопровод трансформатора может быть совмещен с магнитной системой статора, причем стенка статора магнитно связана с тороидальными сердечниками и к одному из сердечников прилепает первичная обмотка трансформатора.

Магнитопровод трансформатора может состоять из двух рядом расположенных тороидов, между которыми установлена первичная обмотка, а вторичная обмотка соединена с обмоткой возбуждения

через переключки, проходящие через кольцевой зазор, выполненный в одном из тороидов.

На рис. 2.4 дана схема описываемого двигателя. Статор 1 двигателя имеет две обмотки — якорную обмотку постоянного тока и трехфазную обмотку синхронизации переменного тока. Дополнительный тороид 2 служит для замыкания магнитных потоков, а осевой магнитопровод 3, боковые тороиды 4 и обхватывающие наружные магнитопроводы 5, являющиеся одновременно и наружными крышками двигателя, — для замыкания переменного магнитного потока, создаваемого катушкой возбуждения 6. Статор боковые и дополнительный тороиды набраны из разрезных листов стали (разрезы воерв смещены относительно друг друга). Ротор 7 крепят на осевом магнитопроводе 3 при помощи подшипников 8, сепараторы которых выполнены разрезными или из неэлектропро-

водного материала. В витке (или витках) 9 переменным магнитным потоком, проходящим через магнитопровод 3, наводится ЭДС, которая при помощи выпрямителя 10 создает постоянный ток возбуждения в проводах (стержнях или полюсах) 11. Провода (или стержни) 12 обмотки переменного тока соединены непосредственно с витком (витками) 9.

Двигатель работает следующим образом. Постоянный ток при помощи щеток 13 и колец 14 подается на подвижные щетки 15, скользящие по вынесенному неподвижному коллектору 16, который кабелем 17 соединен с обмоткой 18 якоря двигателя. Поток возбуждения при помощи катушки возбуждения 6, магнитопроводов 3 и 5, тороидов 4, витков 9, проводов 11 и выпрямительного мостика 10 вводится в двигатель. Взаимодействие потока возбуждения и тока якорной обмотки создает вращающий момент, который передается нагрузке при помощи шестерни, насаженной на торец 19 ротора, и шестерни 20. Щетки 15 вращаются по коллектору синхронно с вращением ротора при помощи сельсина-двигателя, обмотка синхронизации которого кабелем 21 связана с обмоткой 22 переменного тока, расположенной в тех же пазах, что и обмотка якоря двигателя, ЭДС синхронизации в этой обмотке создаются потоком от переменного тока в проводе 12, причем значения этих ЭДС в точности соответствуют положению ротора в каждый момент. Ротор описываемого двигателя имеет малый момент инерции, что позволяет уменьшить время разгона, остановки и реверса двигателя.

Широко применяемые быстродействующие асинхронные электродвигатели с полым ротором, обладающие высокой динамической добротностью, могут, таким образом, быть дополнены близкими по типу синхронными двигателями и двигателями постоянного тока.

Легко показать, что машины с полым токопроводящим ротором могут обеспечить весьма малые значения электрохимической постоянной времени T_m ; любопытно, что при этом, если принять в качестве параметра линейную скорость на поверхности ротора $v_0 = \omega_0 r$ и удлинении полого цилиндра ротора $K = l/r$, значение T_m не будет зависеть от радиуса машины, а только от принятого значения v_0 , толщины полого ротора Δ , плотности материала ротора γ и удельного усилия F' .

Действительно, $T_m = \omega_0 J_a / M_{пр}$, но $\omega_0 = v_0 / r$; искомый момент инерции полого тонкого цилиндра $J_a = \frac{m}{2} (r_n^2 + r_{вн}^2)$, где r_n — наружный, а $r_{вн}$ — внутренний радиусы полого цилиндра.

Примем $J_a = m r^2$, где $r = r_n$, а $m = \gamma 2\pi r l \Delta = \gamma 2K l r^2 \Delta$; $J_a = \gamma \Delta 2K l r^4$.

(2.5)

При принятых допущениях получаем завышенное значение момента инерции J_a — для компенсации неучтенных моментов инерции вала ротора и элементов крепления полого цилиндра на

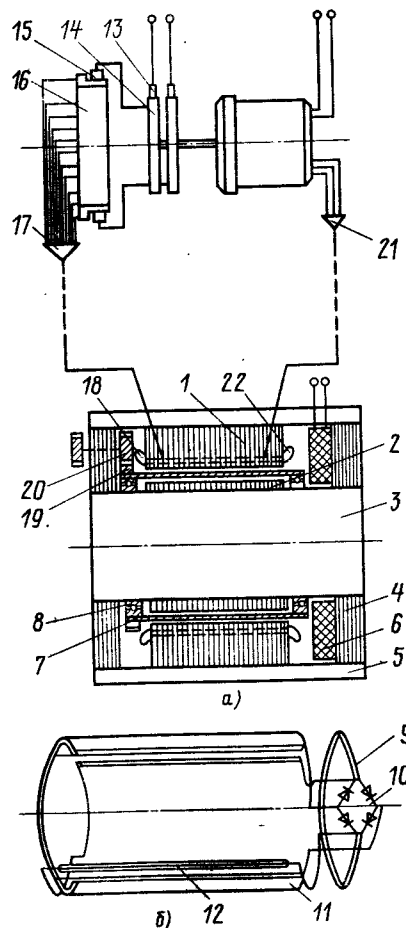


Рис. 2.4. Схема конструкции двигателя. а — продольный разрез и схема соединений; б — электрическая схема обмотки ротора

валу; как показывают расчеты конкретных машин, при достаточно больших значениях удлинений K такие допущения не дают значительных погрешностей.

Момент

$$M_{np} = F' 2\pi r l r = F' 2K\pi r^3. \quad (2.6)$$

Постоянная времени

$$T_m = \frac{\omega}{M_{np}} = \frac{v_0}{r} \frac{\gamma \Delta 2K\pi r^3}{F' 2K\pi r^3} = \frac{v_0 \gamma \Delta}{F'}. \quad (2.7)$$

Для низкоскоростных двигателей безредукторного электропривода значение v_0 намного меньше, чем у высокоскоростных машин, соответственно меньше и их электрохимическая постоянная времени T_m . Но и для относительно высокоскоростных машин, например, при $v_0 = 30$ м/с, $\gamma = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³ (алюминий) и $\Delta = 10^{-3}$ м имеем при $F' = 1,5 \cdot 10^4$ Н/м² (у машин с полым ротором значение удельного усилия ниже, чем у традиционных машин) $T_m = 5,6 \cdot 10^{-3}$ с $\approx 6 \cdot 10^{-3}$ с — вполне удовлетворительное значение.

Для сравнительного анализа представляет интерес вопрос надежности редукторов. Во ВНИИредуктор проведен обстоятельный анализ срока службы изделий, комплектуемых редукторами. Построенная на основе этого анализа гистограмма (рис. 2.5) позво-

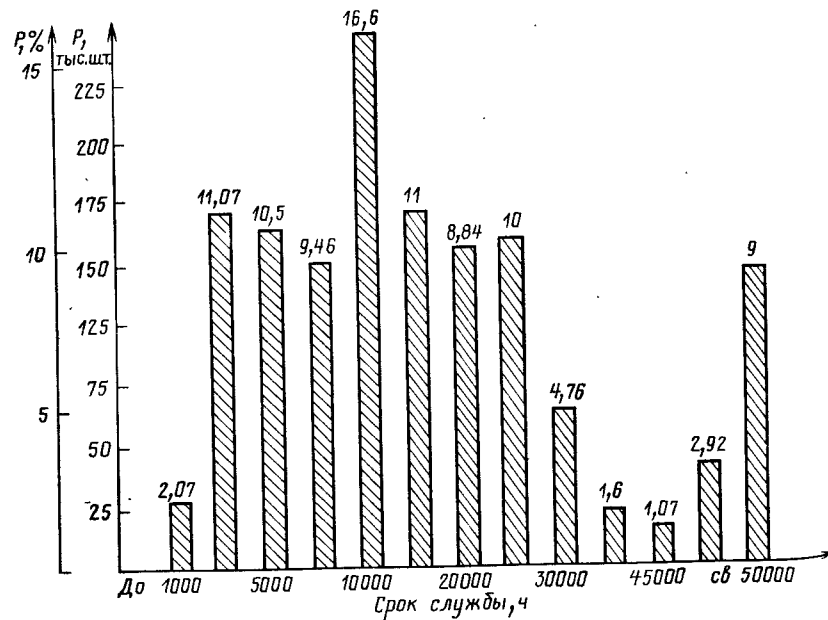


Рис. 2.5. Гистограмма срока службы редукторов

ляет предположить одномодальную кривую, не слишком отличающуюся от усеченного нормального распределения срока службы с модой и медианой в точке, примерно соответствующей 10 000 ч.

2.2. НИЗКОСКОРОСТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Значительное увеличение числа полюсов для крупной машины хоть и не слишком выгодно, но, как правило, выполнимо. Для малой машины обычной конструкции это практически невыполнимо: при диаметре расточки статора, например, в 100 мм у 60-полюсной машины имело бы место полюсное деление $\tau \approx 5$ мм.

Кроме того, даже быстроходная малая машина имеет в несколько раз большую удельную массу, чем более крупная. Так, машина АОЛ-31 мощностью 0,6 кВт при частоте вращения 2950 об/мин ($M = 1,94 \cdot 10^{-1}$ кН·м) имеет массу 12,5 кг и $m'' = 6185$ кг/(кН·м), а машина А101-2 мощностью 160 кВт при той же частоте вращения ($M = 0,52$ кН·м) имеет массу 1020 кг, т. е. $m'' = 1960$ кг/(кН·м) — в 3,3 раза меньше. Однако нужны низкоскоростные машины и малой мощности; необходимы, конечно, и микродвигатели. Соответственно широка классификация таких машин. Укрупненно ее можно представить в следующем виде.

1. Многополюсные машины:

1.1.— обычной конструкции (подробно здесь не рассматриваемые);

1.2.— «гребенчатой» конструкции (подробно рассмотренные в гл. 3);

1.3.— тороидальной конструкции с кольцевой обмоткой (рассмотренные ниже в данном параграфе);

1.4.— асинхронные и синхронные микродвигатели с дробными обмотками (рассмотренные ниже).

2. Индукторные машины (рассмотренные ниже):

2.1.— одноименнополюсные;

2.2.— разноименнополюсные;

2.3.— двойного питания — двухобмоточные и однообмоточные.

3. Специальные бесколлекторные двигатели с электронным коммутатором (рассмотрены ниже).

4. Двигатели с катящимся ротором. Волновой «респонсинный» привод (рассмотрены в § 2.3).

5. Информационные многополюсные машины — двухотчетные безредукторные бесконтактные сельсины (рассмотрены ниже).

Рассмотрим возможности создания многополюсных машин малой мощности при конструктивных решениях, отличающихся от обычных.

Использование кольцевой обмотки и тороидального статора позволило получить в малых габаритных размерах многополюсную систему статора, снизить частоту вращения ротора и создать

плоские электродвигатели, осевая длина которых меньше диаметра [41].

Кольцевая обмотка позволяет воспользоваться наиболее простым из способов понижения скорости вращения — созданием многополюсной обмотки в виде тороида с беспазовым выполнением статора.

Максимально возможное число полюсов, которое можно получить, например, при внутреннем диаметре обычного статора 12 мм, равно 8, в то время как при использовании тороидальной обмотки с беспазовым тороидом при таком же диаметре тороида можно получить число полюсов, равное нескольким десяткам. Конструкция торцевого двигателя с возбуждением от постоянных магнитов показана на рис. 2.6 [41]. Постоянный магнит 1 разделен на две части, каждая из которых расположена на оси 2 между парой дисков 3, 4 и 5, 6. Зубцы 3 и 4, а также 5 и 6 сдвинуты между собой на угол $180/p$ эл. град. Пластины 4 и 6 плоские, а пластины 3 и 5 фигурные. При такой схеме постоянная составляющая индукции в воздушном зазоре отсутствует, так как с обеих сторон тороида имеются полюсы южной и северной полярности. Высшие гармоники при этом незначительны.

Двигатели с постоянными магнитами питаются либо от источника синусоидального сигнала, либо однополярными и разнополярными прямоугольными сигналами. Двигатели рассчитываются на самозапуск.

Для обеспечения однонаправленного движения на оси двигателя помещают храповой механизм. По изложенному принципу выполнен двигатель с числом полюсов $2p = 72$, имеющий наружный диаметр 30 мм и длину 8 мм. Возможно и обычное выполнение тороидальных двигателей. На рис. 2.7 показана соответствующая принципиальная конструктивная схема для многополюсного асинхронного тороидального двигателя с полым ферромагнитным ротором 2, устанавливаемым на оси 3, приводимым во вращение магнитным полем, создаваемым кольцевой обмоткой 4, намотанной на тороид 1.

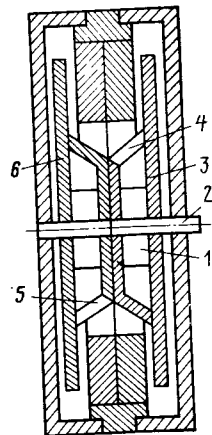


Рис. 2.6. Торцевой тороидальный двигатель

В монографии [41] приводится теоретический анализ таких машин, даются рекомендации по определению их основных размеров. Исследуется индукция в их воздушном зазоре. В диапазоне мощностей 1—10 Вт это 0,3—0,4 Тл для асинхронных машин и 0,1—0,35 Тл для гистерезисных. Интересно сравнение одного из исследованных тороидальных двигателей с обычным гистерезисным двигателем Г-31. При практически одинаковом объеме тороидальный

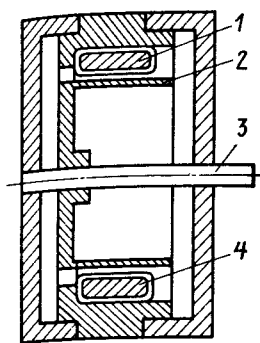


Рис. 2.7. Многополюсный тороидальный двигатель

двигатель создает равную с обычным гистерезисным мощность (4 Вт) при вдвое более низкой скорости; лишь энергетический фактор меньше $\eta \cos \varphi = 0,068$ у тороидального двигателя против 0,09 у Г-31.

Асинхронный тороидальный двигатель с массивным ферромагнитным ротором и ферритовым тороидом относительно несложен в изготовлении, но имеет невысокие показатели, что видно из характеристик такого маломощного двигателя (рис. 2.8): $P_{\max} = 0,125$ Вт и $\eta = 0,04$ при объеме 45 см^3 ; если предположить среднюю плотность машин $\gamma = 4 \text{ кг/дм}^3$, то ее масса должна составить около 0,18 кг, что соответствует удельной массе $m' = 1440 \text{ кг/кВт}$ — много, но не чрезмерно, для столь малой мощности. Потребляемая мощность двигателя $P_1 = 3$ Вт. Ряд тихоходных электродвигателей малой мощности исследован в работах П. Ю. Каасика [33, 34], главным образом в части многополюсных асинхронных и синхронных микродвигателей с дробными обмотками. Результаты опытного исследования характеристик макетных образцов приведены в табл. 2.3. Не рассмотрены массогабаритные показатели, они не очень характерны для микродвигателей с полезной мощностью в несколько ватт.

Исследовался также субсинхронный реактивный двигатель. Этот двигатель имеет статор, в открытые пазы которого уложена многофазная обмотка, и зубчатый ротор. В открытые пазы ротора может быть уложена фазная или короткозамкнутая пусковая обмотка, имеющая сравнительно большое активное сопротивление.

При выборе числа пазов ротора по формуле

$$z_p = z_c + 2p \quad (2.8)$$

ротор будет вращаться в сторону основной гармоники поля статора с частотой вращения

$$n_p = 2f/z_p \quad (2.9)$$

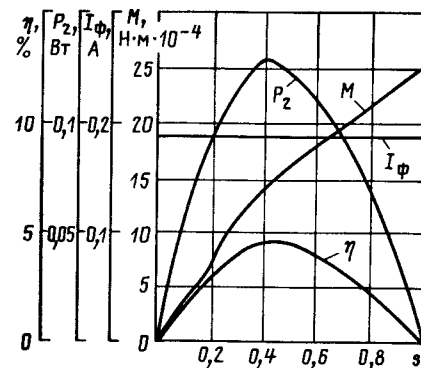


Рис. 2.8. Характеристики макетного образца

Таблица 2.3. Характеристики двигателей с дробными обмотками

Параметр	Двухфазные двигатели						Трехфазные двигатели	
	18	15	14	13	11	10	10	7
p_c	1/3	2/5	3/7	6/13	6/11	3/5	2/5	4/7
q	166,7	200	214	231	273	300	300	428,6
n_p , об/мин	0,31	0,334	0,476	0,47	0,49	0,353	0,216	0,57
M_c , Н·м	74	57	68,5	62	78	68,5	75	80
P_1 , Вт	5,55	7	10,7	11,2	14	11	6,8	25
P_2 , Вт	0,232	0,223	0,358	0,353	0,369	0,265	0,164	0,426
$M_{ном}$, Н·м	70	54	63,5	57	74	65	72	67
$P_{1 ном}$, Вт	4	4,7	8	9	10,5	8,3	5	19,5
$P_{2 ном}$, Вт	0,05	0,08	0,12	0,15	0,14	0,12	0,6	0,29
η	0,7	0,6	0,86	0,82	0,85	0,62	0,87	0,82
$\cos \varphi$	0,04	0,052	0,108	0,13	0,121	0,079	0,061	0,24
$\eta \cos \varphi$								

Если число пазов выбирается из равенства

$$z_p = z_c = 2p, \quad (2.10)$$

то ротор будет вращаться против поля статора с частотой вращения $n_p = f/p$.

Опыт проектирования подобного типа двигателей показывает, что энергетические показатели лучше у двигателей с числом зубцов ротора по (2.10). Однако при этом невозможно применение пусковой обмотки на роторе. Для обеспечения в этом случае надежного самозапуска без специальных пусковых устройств допустимое значение момента инерции не должно превышать величину

$$J_{доп} \leq M_{max} z_p / \omega^2, \quad (2.11)$$

где M_{max} — максимальный синхронный момент. Двигатели с меньшей полюсностью обмотки статора и укороченным шагом имеют более высокие показатели.

В табл. 2.4 приведены данные некоторых макетных образцов изготовленных в лаборатории электрических микромашин ЛПИ им. М. И. Калинина на базе двигателей типа ДВА. Лучшими эксплуатационными характеристиками с этими габаритными размерами обладает двигатель ССРД-5.

Из-за простоты конструкции и свойства развивать тормозной момент в неподвижном состоянии при питании обмоток статора постоянным током субсинхронные двигатели могут найти применение в различных схемах тихоходного и маломощного электропривода при частотном управлении.

Индукторные двигатели могут выполняться в двух основных вариантах: одноименнополюсными, в которых поток возбуждения проходит в плоскости, параллельной оси вала, и разноименнополюсными, в которых поток возбуждения проходит в плоскости перпендикулярной оси вала. Частота вращения ротора тихоходных безредукторных двигателей $n = f/z$.

Таблица 2.4. Опытные данные макетных образцов синхронных тихоходных безредукторных реактивных двигателей при частоте 50 Гц

Параметр	ССРД-1	ССРД-2	ССРД-5	ССРД-6
n_p , об/мин	187,5	375	214	300
t	3	3	3	3
p	4	4	2	2
z_p	32	16	28	20
M_c , Н·м	0,225	0,44	1,5	2,0000
P_1 , Вт	78	108	136	178
P_2 , Вт	4,35	17	33	61,5
η	0,0557	0,157	0,243	0,345
$\cos \varphi$	0,62	0,74	0,64	0,84

Примечание. Двигатели ССРД-1 и ССРД-2 имеют воздушный зазор $\delta = 0,35$ мм, двигатели ССРД-5 и ССРД-6 $\delta = 0,18$ мм.

Поток возбуждения разноименнополюсных машин с радиальным возбуждением создается обмоткой возбуждения, расположенной либо в специальных пазах статора, либо в одних пазах с обмоткой якоря.

Обмотка возбуждения может быть как сосредоточенной, так и распределенной. Число пазов статора z_c и ротора z_p и число пар полюсов обмотки статора p_c и обмотки возбуждения p_f связаны между собой зависимостью

$$z_p = z_c \pm p_c \pm p_f. \quad (2.12)$$

Во избежание трансформаторной связи между обмоткой статора и обмоткой возбуждения число пар полюсов этих обмоток должно различаться в четное число раз, т. е.

$$p_c = 2Kp_f \text{ или } p_f = 2Kp_c, \quad K = 1, 2, 3. \quad (2.13)$$

Перспективными являются двухзубцовые обмотки, предложенные Г. И. Штурманом и Н. Н. Левиным [104]. В лаборатории электрических машин ЛПИ им. М. И. Калинина были изготовлены на базе двигателей типа ДВА ($z = 24$) макетные образцы разноименнополюсных индукторных двигателей с пульсирующим потоком с двухзубцовыми и с распределенными обмотками якоря. Все двигатели имели трехфазную обмотку статора и однофазную обмотку возбуждения. Основные результаты опытного исследования этих двигателей приведены в табл. 2.5.

Конструктивные решения, разбираемые в настоящем параграфе, относятся к специальным случаям, где массогабаритные или энергетические показатели не являются определяющими.

Во многих случаях применение безредукторного электропривода резко повышает основное качество устройства в целом. Так, в частности, обстоит дело с приводом кассетных магнитофонов, электропроигрывателей и аналогичных устройств, где применение редуктора вызывает «плавание» и пульсацию звука, а

Таблица 2.5. Опытные данные макетных образцов синхронных тихоходных двигателей с радиальным возбуждением при частоте 50 Гц

Параметр	СИД-1	СИД-2	СИД-3	СИД-4	СИД-5
P_c	2	2	2	1	1
P_f	6	6	6	2	6
z_p	16	32	16	27	17
$M_{св}$, Н·м	0,16	0,17	0,61	0,58	0,55
P_1 , Вт	42,4	44	65	60	67
P_2 , Вт	5,0	1,6	11,8	5,2	9
n_p , об/мин	187,5	94	187,5	111	176
η	0,12	0,04	0,18	0,087	0,135
$\cos \varphi$	0,79	0,83	0,55	0,4	0,45
$\eta \cos \varphi$	0,095	0,033	0,099	0,035	0,054

также практически неустранимую вибрацию различных деталей аппарата.

Японская фирма «Мацусита электрик» демонстрировала на выставке «Электро-77» в Москве выпускаемые ею для таких аппаратов электродвигатели для безредукторного привода.

К устройствам, где требования точности являются определяющими, относится и широкий класс информационных машин, таких, например, как сельсины. В двухотсчетной системе сельсинов, где в свое время применялся механический редуктор между осями сельсинов грубого и точного отсчетов, в настоящее время применяется для грубого отсчета двухполюсный, а для точного — безредукторный многополюсный, например 64-полюсный, сельсин.

В последние годы предложены бесконтактные сельсины, при которых обе машины совмещены в одну, имеют общий магнитный поток, одну и ту же обмотку возбуждения. В качестве основы одной из таких конструкций был выбран бесконтактный сельсин, рассмотренный в [70], имеющий безобмоточный ротор, состоящий из трех частей, и статор, составленный из трех аксиально разнесенных пакетов, крайние из которых соединены внешним магнитопроводом. В кольцевом зазоре, образованном внешним магнитопроводом и средними пакетами статора, расположена обмотка возбуждения. На статоре расположена и обмотка синхронизации, выполненная общей для всех пакетов.

Для использования такого сельсина в двухотсчетной системе дистанционной передачи средняя часть ротора выполнена многополюсной и состоит из аксиальных пакетов, образующих две когтеобразные системы, каждая из которых через магнитопроводящее кольцо связана с соответствующей двухполюсной крайней частью ротора, а на статоре имеются две обмотки синхронизации, одна из которых выполнена из двух частей, расположенных на крайних пакетах статора, а вторая, многополюсная, расположена на среднем пакете статора.

На рис. 2.9 изображен продольный разрез бесконтактного сельсина. Сельсин содержит безобмоточный ротор, состоящий из

рис. 2.9. Безредукторный двухотсчетный бесконтактный сельсин

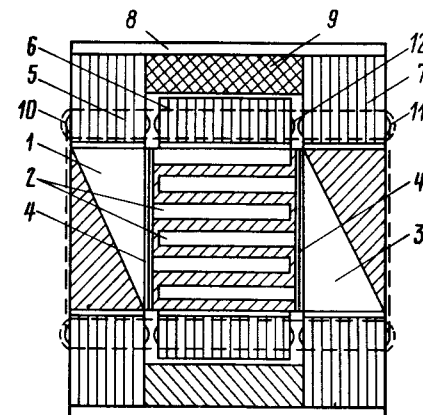
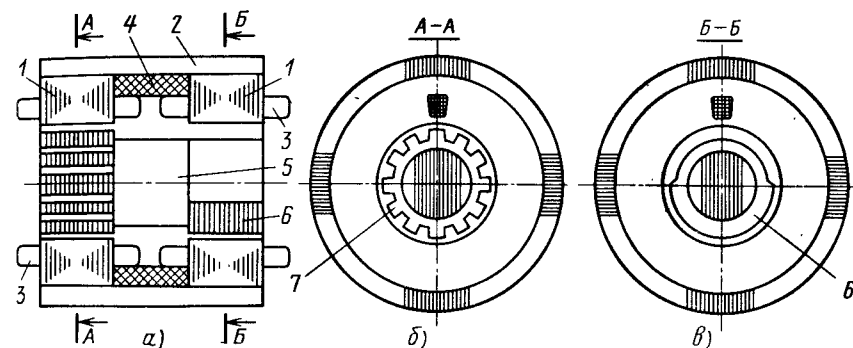


рис. 2.10. Одноименнополюсный бесконтактный сельсин



трех частей 1, 2, 3. Крайние части 1, 3 ротора выполнены двухполюсными, а средняя многополюсная часть состоит из магнитопроводящих пакетов, образующих две когтеобразные системы, каждая из которых через магнитопроводящие кольца 4 связана с соответствующей крайней частью ротора. Статор сельсина выполнен в виде трех аксиально разнесенных пакетов 5, 6, 7, крайние из которых (пакеты 5, 7) объединены внешним магнитопроводом 8. В кольцевом промежутке, образованном средним пакетом 6 статора и внешним магнитопроводом 8, расположена обмотка возбуждения 9. На статоре имеется обмотка синхронизации, выполненная в виде двухполюсных обмоток 10 и 11, расположенных на крайних пакетах статора, и многополюсной обмотки 12, расположенной на среднем пакете статора.

Определенные достоинства имеет и одноименнополюсная система такого сельсина [70]. Статор сельсина составлен из двух аксиально разнесенных пакетов, соединенных между собой общим магнитопроводом. Между пакетами находится обмотка возбуждения, и обмотки синхронизации расположены на каждом пакете

статора. На одном конце безобмоточного цилиндрического ротора установлен полюсный башмак, занимающий часть окружности ротора, другой конец ротора выполнен зубчатым.

На рис. 2.19, *а* — представлен бесконтактный сельсин (*а* — продольный разрез, *б* — сечение А-А, *в* — сечение Б-Б).

Сельсин содержит статор, состоящий из двух аксиально разнесенных пакетов 1 (рис. 2.10), соединенных внешним магнитопроводом 2. На каждом из пакетов статора размещена обмотка синхронизации 3, а в промежутке между пакетами 1 и магнитопроводом 2 расположена обмотка возбуждения 4. В безобмоточном роторе 5 с одного конца установлен полюсный башмак 6, а другая часть ротора выполнена многозубчатой с зубцами 7. Обмотка синхронизации пакета статора, расположенного над многозубчатой частью ротора, имеет в 2 раза большее число полюсов по сравнению зубчатой частью. Обмотка синхронизации 3, размещенная на пакете 1 статора, расположенным над полюсным башмаком 6, выполнена двухполюсной.

Безредукторные конструкции информационных машин могут оказаться не менее интересными, чем конструкции силовых машин.

Приведенные выше разработки в этой области относятся к машинам с безобмоточным ротором, прототипом которых является известный бесконтактный сельсин ВЭИ (БС ВЭИ). Выполнение машины с большим числом полюсов для другого типа бесконтактного сельсина с роторной обмоткой, питаемой через кольцевой трансформатор, весьма затруднительно. Представляется целесообразным в связи с этим остановиться на сравнении надежности и быстродействия (в индикаторной схеме) этих двух принципиальных конструкций. Нужно отметить, что основное достоинство бесконтактных сельсинов — повышение их надежности — достигается не столько путем ликвидации контактного перехода щетка — кольцо, сколько путем устранения обмотки (чаще всего распределенной обмотки) на роторе. Известно, что, например, у коллекторных машин 75—80% отказов возникает из-за распределенной обмотки (якоря, компенсационной обмотки), 7—8% из-за сосредоточенной обмотки полюсов и около 11% из-за коллекторно-щеточного узла [96]. У сельсина-датчика, сельсина-трансформатора, вращающихся трансформаторов условия работы щеточного контакта обычно лучше, чем у коллектора, и лишь у сельсинов-приемников индикаторной передачи они хуже из-за трудностей обеспечения значительного нажатия щеток на кольца.

У бесконтактных сельсинов с кольцевым трансформатором не только сохраняется распределенная обмотка на роторе, но кроме дополнительной сосредоточенной обмотки на статоре (она есть в БС ВЭИ) устанавливается еще одна дополнительная сосредоточенная обмотка на роторе.

Обработка рекламаций (обычно дающих заниженное число

отказов — не все они оформляются рекламациями) показала наличие 60 отказов на примерно $2 \cdot 10^7$ сельсино-часов эксплуатации бесконтактных сельсинов с кольцевым трансформатором, что дает интенсивность отказов порядка $3 \cdot 10^{-6}$ 1/ч (раза в 3 хуже, чем у БС ВЭИ [66]), причем треть отказов возникает в роторных обмотках бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором.

Тот факт, что при наличии обмотки на роторе удается получить несколько более высокую точность, вообще не имеет отношения к проблеме бесконтактности — самые точные вращающиеся трансформаторы, например ВТ-5, выпускаются с контактной системой.

Выше указывалось на особое значение устранения контактного перехода для сельсина-приемника индикаторной передачи. Но именно в этом случае особенно невыгодно применять ротор с обмотками, наличие которых увеличивает массу ротора. При этом необходимо иметь еще и увеличенный диаметр ротора. Все это в 2—3 раза увеличивает момент инерции и значительно снижает статическую и динамическую добротность приемника.

Повышение добротности может быть достигнуто увеличением синхронизирующего момента, но это при заданных габаритных размерах связано с повышением электромагнитных нагрузок, что всегда ведет к резкому снижению надежности.

Попытка заменить кольцевой трансформатор второй машиной, типа предложенной Е. Тирман, с распределенными обмотками на статоре и роторе [70] приводит к появлению вместо двух сосредоточенных обмоток кольцевого трансформатора двух распределенных обмоток, что может только еще больше снизить надежность машины.

Таким образом, представляется наиболее рациональным выполнять безредукторную двухотсчетную сельсинную систему на базе прототипа БС ВЭИ, используя, например, предложенные в [70] и рассмотренные выше решения.

Большое значение имеет безредукторный электропривод для робототехники. В СССР освоен серийный выпуск роботов, в том числе роботов-манипуляторов на 14 движений — по 7 на каждую «руку». В [39] приводится кинематическая модель руки, имеющая 27 степеней свободы, а в [21] — таблица параметров движения элементов руки (табл. 2.6), иллюстрирующая необходимость высокого быстродействия таких роботов, которые имеют 7 степеней свободы, выполняя основные производственные функции руки в манипуляторе. У роботов-манипуляторов важным требованием является обеспечение ощущения оператором момента сопротивления производимой операции. Для этой цели часто применяются так называемые обратимые следящие системы, в большом числе случаев — сложная трансформаторная схема.

В СССР серийно выпускаются электромеханические сельсинные манипуляторы МЭМ-5С и МЭМ-10С, полностью удовлетво-

Таблица 2.6. Максимальные параметры движения человеческих рук

Движение	Угол поворота α , рад	Скорость ω , рад/с	Ускорение $\dot{\omega}$, рад/с ²	Время переходного процесса t , с
Вращение плеча	1,5	7	70	0,1
Изгиб плеча	1,5	10	120	0,084
Вращение локтя	3	17	300	0,057
Изгиб локтя	2	15	200	0,075
Вращение кисти	3	20	500	0,04
Изгиб кисти	1,5	15	450	0,033
Движение схвата	1,5	15	350	0,043

ряющие этому требованию, но использующие простейшие сельсинные схемы с усилением момента (благодаря применению сдвига фаз возбуждений датчика и приемника [70] МЭМ-5С и использованию совмещенных сельсинов-двигателей с полым ротором [40] МЭМ-10С). Но индикаторная сельсинная схема обладает также свойством обратимости по положению. Действительно, роторы сельсинов согласуются независимо от того, на какую ось поступает управляющее воздействие: на ось сельсина-датчика или на ось сельсина-приемника. Эта схема обладает также и свойством обратимости по моменту: момент, приложенный к оси сельсина-датчика, воспринимается осью сельсина-приемника, и наоборот. Ошибка в положении осей сельсина-приемника и сельсина-датчика определяется синхронизирующим моментом, равным разности моментов, приложенных к этим осям.

Индикаторная схема, построенная на самых мощных сельсинах (датчик НД-521 и приемник НС-501), имеет максимальный синхронизирующий момент 0,26 Н·м, что недостаточно для применения ее в качестве системы управления манипулятором безредукторной схеме.

Сельсины типа СС-195, выпускаемые для силовых синхронных следящих систем с удельным синхронизирующим моментом 0,15 Н·м/град, не могут быть применены в манипуляторе из-за значительной массы (более 60 кг).

Индикаторная схема с сельсином-датчиком типа НД-521 и сельсином-приемником того же типа развивает максимальный синхронизирующий момент 1,2 Н·м при рассогласовании сельсинов на 70° и имеет удовлетворительные статические и динамические характеристики. Чтобы применить данную систему в манипуляторе малой грузоподъемности, необходимо между осью сельсина-датчика и задающего органа и сельсина-приемника исполнительного органа установить понижающие редукторы соответственно P_1 и P_2 с передаточным числом i . Это, с одной стороны, увеличит синхронизирующий момент и точность отработки системы в i раз, но с другой — приведет к возможности ложного согласования осей системы в 360/ i положениях, а также к значительному искажению в передаче моментов с исполнительного

органа на задающий вследствие сил трения и инерции в редукторах и сельсинах. Поскольку контроль за положением исполнительных «рук» манипулятора осуществляется оператором визуально, возможность ложного согласования задающих и исполнительных «рук» манипулятора не представляет опасности. Перед началом и в процессе работы оператор всегда может согласовать их положение.

Для уяснения свойств системы в передаче усилия рассмотрим уравнение моментов при движении входной оси с постоянным ускорением:

$$M_1 = M_2 + M_{\text{тр}1} + M_{\text{тр}2} + (J_1 + J_2) \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (2.14)$$

где M_1 и M_2 — соответственно моменты на задающей (входной) и исполнительной (выходной) осях; $M_{\text{тр}1}$ и $M_{\text{тр}2}$ — приведенные к входной оси моменты трения сельсинов и редукторов; J_1 и J_2 — приведенные моменты инерции роторов сельсинов и звеньев кинематических цепей от валов сельсинов до входного и выходного валов системы; α — угол поворота вала задающего механизма.

Из полученного уравнения видно, что оператор, кроме полезного момента, равного приложенному моменту нагрузки M_2 , будет ощущать приведенные к входной оси моменты трения звеньев кинематических цепей исполнительного и задающего механизмов $M_{\text{тр}1}$, $M_{\text{тр}2}$, а также приведенные динамические моменты от инерции роторов сельсинов и связанных с ним звеньев кинематических цепей $(J_1 + J_2) d^2\alpha/dt^2$.

Приведенные моменты трения находятся в прямой зависимости от передаточного числа редукторов i , а приведенные динамические моменты будут прямо пропорциональны квадрату передаточного числа. При значительной редукции вредные моменты от сил трения и инерции могут в несколько раз превышать приложенный к исполнительному органу момент нагрузки M_2 .

В подобных случаях оператору трудно контролировать усилия, приложенные к исполнительному органу, кроме того, ему придется затрачивать большие усилия для управления даже ненагруженным манипулятором. С введением масштабности в передаче момента с исполнительного органа на задающий уменьшается действие вредных моментов на руку оператора, а следовательно, облегчается управление манипулятором.

При этом уравнение моментов запишется в следующем виде:

$$M_1 = M_{\text{тр}1} + K_m (M_2 + M_{\text{тр}2}) + (J_1 + K_m^2 J_2) \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (2.15)$$

где K_m — коэффициент масштабирования.

Разработка сельсинных схем с усилением момента позволила упростить трансформаторную схему, сохранив все ее рабочие функции. Для манипуляторов с небольшими усилиями на вы-

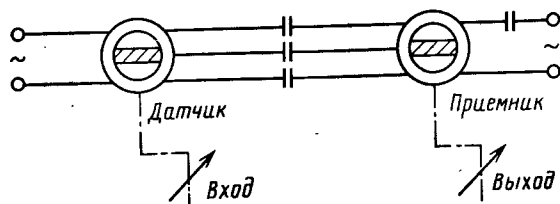


Рис. 2.11. Индикаторная сельсинная схема с усилением момента

ходной оси для каждого из четырнадцати движений была использована одна индикаторная сельсинная схема с фазосдвигающими емкостями (рис. 2.11).

Приведем основные результаты расчета этой схемы для манипулятора МЭМ-5С [70]. Из расчетных кривых $M = f(\delta)$ (рис. 2.12) следует, что в системе с сельсинами НД-521 при включении в цепь возбуждения приемника конденсатора емкостью 200 мкФ и номинальных по абсолютной величине фазных ЭДС датчика и приемника (рис. 2.12, а) масштабный коэффициент равен 0,67. Если уменьшить ЭДС датчика в 1,1 раза, коэффициент масштабирования снизится до 0,5 (рис. 2.12, б), а при уменьшении ЭДС в 1,31 раза станет равным примерно 0,4 (рис. 2.12, в). При этом, правда, максимальный момент на валу приемника в относительных единицах снизится с 1,28 до 1 (т. е. станет равным моменту при синфазном питании сельсинов), зато датчик разгрузится более чем в 2 раза. Эти выводы подтверждены экспериментальными зависимостями, представленными на рис. 2.12 (пунктирные линии).

Теоретические положения и выводы, сделанные в [70], подтверждены в дистанционных электромеханических манипуляторах типа МЭМ-5С грузоподъемностью 50 Н. В них для управления

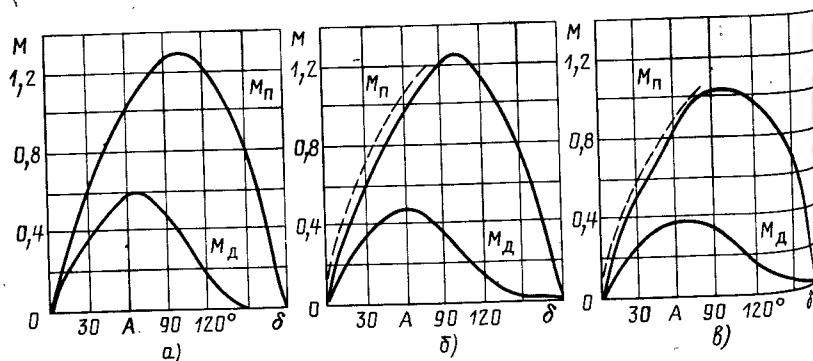


Рис. 2.12. Зависимость синхронизирующего момента в относительных единицах на валах датчика и приемника НД-521 от угла рассогласования в системе синхронной связи с конденсатором

каждой из степеней подвижности механических рук использованы сельсинные индикаторные схемы с конденсатором емкостью 200 мкФ в цепи возбуждения сельсина-приемника типа НД-521, а для улучшения работы системы напряжение возбуждения датчика снижено до 0,8 номинального. Применение этой схемы позволило значительно снизить стоимость и в несколько раз повысить надежность системы управления манипулятором.

Система обеспечила работоспособность манипулятора при следующих технических данных (движение, качение кисти): грузоподъемность 50 Н; масштабность в передаче момента с исполнительного органа на управляющий с учетом влияния моментов трения и инерции системы 1:1; максимальная скорость конца рабочего инструмента 685 мм/с; максимальное ускорение 2690 мм/с²; усилие трогания 6 Н.

Для создания электромеханического сельсинного манипулятора большей мощности к рассмотренной системе была добавлена схема компенсационного усилителя с использованием совмещенных сельсинов-двигателей СДС-3М.

Статор двигателя СДС-3М аналогичен статору сельсина НД-521, алюминиевый полый ротор может вращаться в подшипниках относительно вала внутреннего ротора. Обмотка внутреннего ротора однофазная, статорная — трехфазная. Все три фазы двигателя могут быть использованы в случае применения двигателя в следящей системе в качестве совмещенного сельсина-двигателя. При этом статорная обмотка служит обмоткой синхронизации. Момент полого ротора зависит от угла поворота внутреннего ротора относительно статора. При совпадении осей обмоток в зазоре машины отсутствует вращающееся магнитное поле и полый ротор неподвижен. При повороте внутреннего ротора в зазоре возникает вращающее магнитное поле и полый ротор начинает вращаться. Момент и скорость полого ротора зависят от абсолютной величины угла поворота внутреннего ротора и достигают максимальных значений примерно при 80—100°. Направление вращения и знак момента зависят от знака угла поворота.

Совмещенный сельсин-двигатель типа СДС-3М имеет следующие технические характеристики: максимальный пусковой момент не менее 0,4 Н·м, частота вращения в режиме холостого хода примерно 2700 об/мин. Механическая характеристика (зависимость момента от скорости) при угле поворота внутреннего ротора $\theta = 90^\circ$ монотонно падающая с нелинейностью 25%. Двигатель обладает удовлетворительными регулировочными характеристиками и не уступает обычным двигателям с полым ротором соответствующих габаритных размеров, работающим «на упор». СДС-3М работает «на упор» при моменте 0,4 Н·м ($\theta = 70^\circ$) с продолжительностью включения 30%. Для нормальной работы необходим интенсивный обдув двигателя, так как при непрерывном включении и пусковом режиме в течение 30 мин

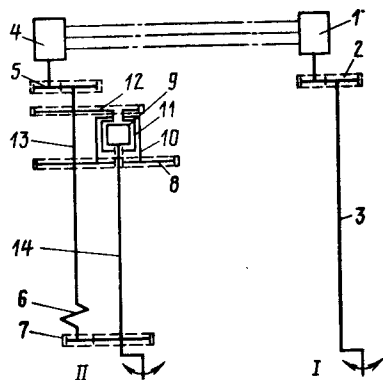


Рис. 2.13. Схема безусилительной обратной системы с мотосином

обмотка внутреннего ротора нагревается на 130°C . Напряжение питания статорной и роторной обмоток 45 В, частота питания 50 Гц, емкость конденсатора в статорной обмотке 300 мкФ.

На рис. 2.13 приведена кинематическая схема управления одной степенью подвижности манипулятора с использованием

СДС-3М. Исполнительный механизм I включает сельсин-приемник 1, понижающий редуктор 2, выходной вал 3. Управляющий механизм II состоит из сельсина-датчика 4, понижающего редуктора 5, упругой муфты 6, которая через шестеренчатую передачу 7 соединена с внутренним ротором 9 двигателя СДС-3М 10. Вал внутреннего ротора сочленен с входным валом системы 14. Кроме того, через шестеренчатую передачу 8 муфта 6 соединена с корпусом двигателя 10. Полый ротор СДС-3М через шестеренчатую передачу 12 соединен с выходным валом привода 13. Электрически сельсины (датчик СД и приемник СП) соединены по обычной схеме для сельсинов, работающих в индикаторном режиме. Обмотка ротора двигателя СДС-3М включена в сеть; в обмотку статора включен конденсатор С емкостью 300 мкФ. При соединении механической передачи статора СДС-3М с его полым ротором получается замкнутая пропорциональная следящая система, осуществляющая слежение статора СДС-3М за его внутренним ротором.

Система работает следующим образом. При повороте входного вала привода 14 (см. рис. 2.13) деформируется упругая муфта 6 и ось внутреннего ротора 9 двигателя СДС-3М смещается относительно оси его статора 10. Полый ротор 11 приходит во вращение и, поворачивая через шестеренчатую передачу 12 редуктор 5 и сельсин-датчик 4, компенсирует трение и инерцию этой части кинематической цепи, одновременно приводя через передачу 8 статор двигателя СДС-3М 10 в согласованное положение с внутренним ротором 9. Сельсин-приемник 1 приводит выходной вал исполнительного механизма в согласование с входным валом управляющего механизма 14. Так осуществляется позиционное слежение исполнительного органа за задающим.

Приложенный к валу исполнительного механизма момент на грузки передается сельсином-датчиком 4 через редуктор 5, упругую муфту 6, шестеренчатую передачу 7 на входной вал 14; одновременно через шестеренчатую передачу 8 статор двигателя СДС-3М рассогласовывается из-за деформации упругой муфты

6 с его внутренним ротором 9. В результате на валу 13 создается противодействующий момент M_d . Изменяя напряжение питания СДС-3М, передаточное число передачи 12 и жесткость упругой муфты 6, можно добиться, чтобы этот противодействующий момент M_k был равен моменту трения кинематической цепи от полого ротора двигателя СДС-3М до сельсина-датчика 4 и приведенному к валу 13 моменту трения кинематической цепи исполнительного механизма. Тогда масштаб передачи момента близок к единице, $M_1 = M_2$. Если момент M_k превышает значения вредных моментов, то $M_1 < M_2$, т. е. момент, приложенный к валу 3 исполнительного механизма, будет передаваться на вал 14 управляющего механизма в определенном масштабе.

Реализация приведенной кинематической схемы в манипуляторах сопряжена с конструктивными трудностями: для подвода питания к вращающемуся статору мотосина необходимо устанавливать токосъемные кольца и щетки, что снижает надежность системы управления. Приведенная на рис. 2.14 схема системы управления лишена этих недостатков. В данной схеме статор СДС неподвижен, а согласование компенсирующей следящей системы осуществляется через дифференциал, что облегчает конструктивную компоновку коробки приводов манипуляторов, уменьшает до минимума наличие электрических контактов в схеме.

Описанная система управления (рис. 2.13) реализована на манипуляторе типа МЭМ-10СД грузоподъемностью 100 Н. При высокой надежности в работе, простоте устройства и эксплуатации достигнуты вполне удовлетворительные технические характеристики манипулятора, например, на движении «качение ки-

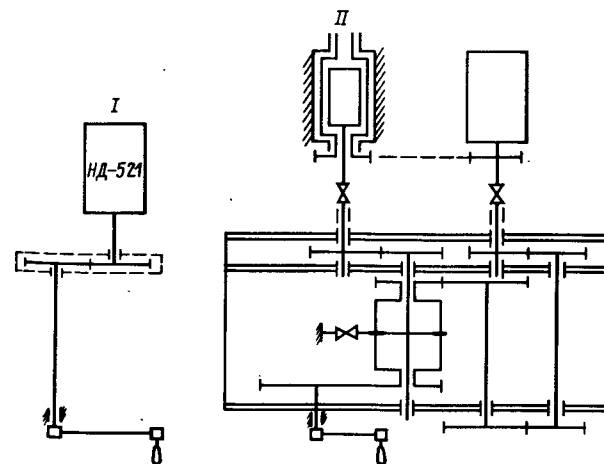


Рис. 2.14. Кинематическая схема безусилительной обратимой следящей системы с мотосином

сти»: средняя линейная скорость конца рабочего инструмента 370 мм/с; максимальное ускорение конца рабочего инструмента 1540 мм/с²; усилие трогания ненагруженного манипулятора 0,07 Н; масштабность в передаче усилия 1:1,7.

Приведем в заключение табл. 2.7, наглядно иллюстрирующую технико-экономическую эффективность применения в манипуляторах новых типов дистанционных передач [70].

Для ранее применявшейся следящей схемы манипулятора МЭМ-10В интенсивность отказов в целом

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{m=8} \lambda_i n_i = 2931 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

где m — число групп однотипных элементов; n_i — число элементов в группах. Среднее время работы схемы $T_{\text{ср}} = 1/\Lambda = 340 \text{ ч.}$

Время безотказной работы с вероятностью $P = 0,9$ $T = 34 \text{ ч.}$ Для следящей схемы с совмещенным сельсином-двигателем

$$\text{МЭМ-10СД } \Lambda = \sum_{i=1}^{m=3} \lambda_i n_i = 378 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч, } T_{\text{ср}} = 2640 \text{ ч, } T = 264 \text{ ч}$$

при $P = 0,9$.

Таблица 2.7. Основные устройства следящей системы манипуляторов (на один комплект — 2 «рук»)»

Наименование	Тип	Цена 1 шт., руб.	$\lambda \cdot 10^6$, 1/ч	Количе- ство, шт.
<i>Обычная схема</i>	<i>Манипулятор МЭМ-10В</i>			
Электродвигатель	ДВ-200Т	395	10	20
Электромашинный усилитель	ЭМУ-5А-П	200	25	20
Электронный усилитель		230	95	—
в том числе:				
лампа	6Н1П	—	8	40
диод	Д226	—	6	160
транзистор	—	—	6	60
сопротивление	МЛТ-0,5	—	0,5	400
»	СПО-2	—	0,5	100
»	КСО-2	—	0,1	20
конденсатор	КБГИ	—	0,1	60
»	КЭ-2	—	0,1	20
»	МБГИ-2	—	0,1	40
»	МБМ	—	0,1	60
Сельсин	КС-3	17	4,5	20
»	КС-4	17	4,5	20
Тахогенератор	ДГ-1Т	29		12
Двигатель	АДП-123Б	25	108	2
Преобразователь	АЛА-1,5	254	25	1
<i>Новая схема</i>	<i>Манипулятор МЭМ-10СД</i>			
Сельсин	НД-521	23	4,5	28
Совмещенный сельсин-двигатель	СДС-3М	180	10	14
Электромагнитный тормоз		6	4	28

Надежность следящей схемы манипулятора МЭМ-10СД выше, чем у МЭМ-10В, в 7,8 раза.

Общая стоимость основных устройств следящей схемы МЭМ-10В 17 832 руб., МЭМ-10СД — 3322 руб. С учетом изменения объема стенов управления и облегчения всей конструкции снижение стоимости на один комплект составило примерно 30 тыс. руб.

Указанные манипуляторы выполнены на базе СДС — машины с полым ротором и редуктором, но приведенный выше вывод о меньших значениях постоянной времени T_m у больших машин с меньшим произведением $\omega_0 J/M$ и рассмотренные в гл. 1 соображения о массогабаритных соотношениях безредукторного и редукторного приводов позволяют считать перспективным разработку манипулятора сельсинного типа с безредукторным приводом в виде многополюсных СДС с полым ротором.

Перспективным электромеханическим приводом роботов-манипуляторов следует считать привод с непосредственным линейным перемещением, в котором использован линейный вариант машины двойного движения; ряд преимуществ этого привода в сравнении с гидравлическим, электрогидравлическим, электромагнитным и другими приводами показан в § 4. 3.

2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Одним из интересных способов решения задачи электрической редукции являются так называемые электрические машины с катящимся ротором. Имеется значительное количество работ по этим машинам — начиная с авторского свидетельства А. И. Москвитина [47] и его статьи [48]; ряд изданий перечислен в монографии [7].

Конструктивная схема электродвигателя с катящимся ротором (ДКР) приведена на рис. 2.15. Ротор ДКР расположен эксцентрически в расточке статора 1 и опирается прикрепленными к нему катками 2 на конические направляющие статора; при этом между поверхностями ротора и расточки статора сохраняется некоторый минимальный зазор. Ротор состоит из торцевых магнитопроводов 3 и цилиндрического магнита 4, намагниченного в осевом направлении и создающего униполярный постоянный поток в машине.

В соответствии с особенностью конструкции ДКР ротор является несбалансированной массой, которая при своем движении сообщает колебательные движения электродвигателю. Для уменьшения вибрации на выходном валу статор ДКР крепится к фланцу с помощью эластичной подвески 6.

Статор 1 имеет шесть П-образных шихтованных пакетов с катушками 5, залитых эпоксидным компаундом и образующих монолитную конструкцию. Обмотка статора двухполюсная и может использоваться при двух- и трехфазном питании.

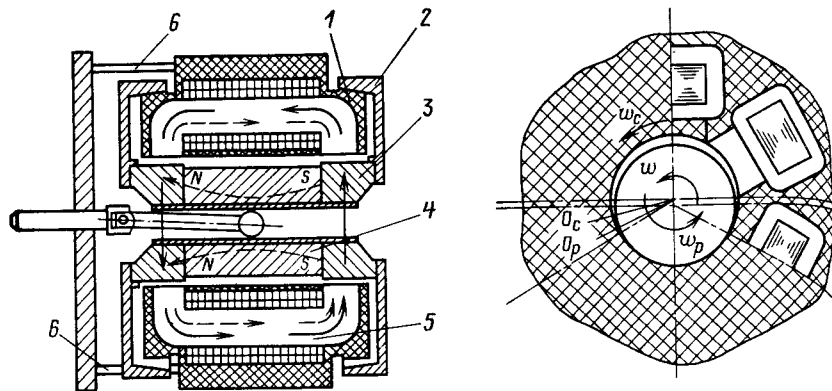


Рис. 2.15. Схема машины с катящимся ротором

Если включить обмотку статора на переменное напряжение в эксцентрическом воздушном зазоре произойдет сложение полей. Поскольку магнитная система несимметрична, появится результирующая сила одностороннего магнитного притяжения, вектор которой будет вращаться синхронно со скоростью вращения поля обмотки якоря.

Ввиду того что сила магнитного притяжения изменяет во времени свое положение относительно минимального зазора, ротор начинает перемещаться в расточке статора. При этом синхронное с полем перемещается по расточке и точка касания на поверхностях обкатывания; с той же скоростью ω_c ось ротора O_p вращается относительно оси расточки статора O_c .

Вместе с относительно быстрым обкатыванием система ротор — катки медленно поворачивается вокруг своей оси в ту же сторону. Это вращение является рабочим и передается на выходной вал 7 с помощью передачи насосного вращения 8. Перемещение «точки касания» есть перемещение оси постоянного потока («оси полюса») — она проходит за один оборот πD_c . Ось вращения магнитного потока проходит при этом вокруг поверхности ротора πD_p . Для того чтобы между ними сохранился неизменный для синхронной машины при данной нагрузке угол θ , ротор должен отставать при этом на отрезок дуги своей окружности

$$\alpha D_p / 2 = \pi D_c - \pi D_p, \quad (2.16)$$

или на угол

$$\alpha = 2\pi \frac{D_c - D_p}{D_p}. \quad (2.17)$$

При синхронной скорости поля ω_1 ротор должен вращаться в обратном направлении с угловой скоростью

$$\omega_2 = \frac{\alpha}{2\pi} \omega_1 = \omega_1 \frac{D_c - D_p}{D_p}, \quad (2.18)$$

или

$$\omega_2 = \omega_c \frac{D_k - D_n}{D_k} = \frac{\omega_c}{i}, \quad (2.19)$$

где D_k — диаметр катка; D_n — диаметр направляющей; $i = D_k / (D_k - D_n)$ — редукция синхронной скорости.

Как следует из приведенных выражений, редукция определяется соотношением диаметров поверхностей обкатывания и может быть довольно большой.

Практически ДКР целесообразно выполнить на частоте вращения 5—100 об/мин при частоте сети $f_c = 50$ Гц.

Поверхности обкатывания электродвигателя могут быть выполнены как гладкими (показаны на рис. 2.15), так и зубчатыми. В первом случае механическая характеристика ДКР будет относительно мягкой (рис. 2.16, а) вследствие механического проскальзывания на поверхностях обкатывания, во втором — жесткая (синхронная) (рис. 2.16, б).

Достоинства ДКР:

1. Тихоходность двигателя и отсутствие редуктора.
2. Малоинерционность (практически во всем диапазоне мощности). Время разгона и выбега не превышает 0,01 с, время реверса около 0,015 с при $f = 50$ Гц.
3. Развивает большой тормозной момент при отключении питающей сети; тормозной момент примерно вдвое превышает номинальный.
4. Относительно малая кратность пускового тока при большом тормозном моменте.
5. Отсутствие подвижных электрических контактов.
6. Относительно высокие энергетические показатели.
7. Возможность использования в шаговом режиме с большой точностью отработки малых шагов (порядка 1000 и более шагов на оборот).
8. Отсутствие необходимости в применении ограничительных устройств и конечных выключателей, поскольку при перегрузках

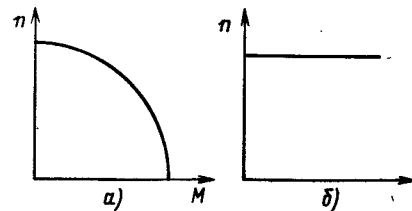


Рис. 2.16. Механические характеристики машины с катящимся ротором

Таблица 2.8. Технические данные тихоходных двигателей

Модель	Тип	Число фаз m	Частота вращения вала n , об/мин	Синхронная частота вращения вала n_s , об/мин	Номинальный момент M_2 , Н·м	Потребляемая мощность S , В·А	Полезная мощность P_2 , Вт	$\eta \cos \varphi$	Масса m , кг	m^1 , кг/кВт
ДКР-5 (Франция)	Синхронный с катящимся ротором	1	50	2—200	0,441—2,354	50	2,5—10	0,05—0,2	2	800—200
ДКР-52 (Франция)	То же	1	50	2—200	1,177—3,924	90	0,45—22,5	0,005—0,25	2,5	5555—111
ДКР (Англия)	»	1	50	15—60	1,766—2,845	20	—	—	0,9	—
ДКР (Япония)	»	1	50	15—60	28,449	350	45—180	0,128—0,51	9	200—50
ДКР (Япония)	»	1	50—60	30—36	0,981	80—90	3,1—3,7	0,04	6	1935—1620
ДКР (Япония)	»	1	50—60	30—36	9,81	180—200	31—37	0,172—0,185	14	452—378
ДКР (Австрия)	»	3	50	30	6,867	170	22,95	0,153	—	—
ДКР-МЭИ	»	1	50	30—60	0,167	26	0,52—1,04	0,02—0,04	1,5	2885—1442
ДКР с «облегченным» ротором	Синхронно-реактивный с катящимся ротором	3	400	67	0,392	0,25	0,003	0,012	0,33	110 000
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	3	400	62	3,139	410	20,5	0,05	1,1	53,7
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	3	400	83	0,883	154	7,7	0,05	0,35	46,5
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	1	50	22	2,158	56	4,65	0,083	2	430
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	1	50	19	2,354	5,5	0,44	0,08	2	4545
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	3	50	23	7,848	48	18	0,375	6,3	350
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	3	50	30	2,943	30	7,8	0,26	3	385
ДКР-МАИ	Синхронный с катящимся ротором	3	50	30	9,81	70	21	0,3	7,5	357
ДК-16	Асинхронный с ре-	1	50	60	0,294	185	1,85	0,01	5	2703
СВД	То же	1	50	15	0,441	16,7	0,7	0,042	7,5	10 714
ЭДР-5	»	1	50	5—40	1,275—9,81	159—162	4,29—5,51	0,027—0,034	4,5	1049—817
СОД-220	Синхронный с ре-	1	50	16,67	0,441	17,9	0,77	0,043	7,5	9740
СРД-Р1	Синхронный ре-	3	50	300	0,216	102	6,83	0,067	1	146
СРД-Р2	Синхронный ре-	3	50	375	0,245	127	9,91	0,078	1	101
СРД-Р7	То же	3	50	200	0,098	49	2,06	0,042	1,1	534
ДШ-10А	Шаговый	2	70	210	0,981	135	—	0,16	14,8	—

и заклинивании привода обмотка ДКР практически не подвергается риску повреждения от перегрева.

9. Возможность получения синхронной (жесткой) механической характеристики.

10. Возможность использования в системах синхронного и синфазного валов.

В настоящее время электродвигатели с катящимся ротором находят применение в различных автоматических и полуавтоматических установках, программных и управляемых механизмах, следящих и телеуправляемых системах.

ДКР применяется для привода дозаторов, клапанов, задвижек и регулирующих вентилей.

Благодаря малоинерционности ДКР находит применение в точных механизмах: для приводов нониусов копировальных станков; для намотки реохордов, потенциометров; в часовых механизмах; в различных системах телеметрического управления, например для привода «механических рук» при точных манипуляциях с радиоактивными продуктами. Двигатель устанавливается непосредственно для привода рукояток управления различных машин, движков реостатов и потенциометров, подвижных стрелок контроля.

В табл. 2.8 приводятся данные (в основном из [7]) о выпускаемых в различных странах ДКР в сравнении с некоторыми другими электроприводами близкой мощности.

2.4. РЕСПОНСИННЫЙ ПРИВОД

Электродвигатель, совмещенный с волновым передаточным механизмом, получил название респонсинного привода [113]. У пускового фирмой USM (США) синхронного реактивного нового электромагнитного механизма (ВЭМ) типа 16-100-01 $M = 0,88$ Н·м и частоте питания $f = 60$ Гц, угловой частоте вращения выходного вала $\omega = 3,8$ рад/с полезная мощность $P_2 = 3,3$ Вт при потребляемой мощности $S_1 = 30$ В·А, т. е. $\eta = 0,11$ и $m = 1,35$ кг, а $m' = 410$ кг/кВт — для столь малой машины и низкой скорости вполне приемлемые показатели.

В [15] рассмотрено устройство шестифазного цилиндрического волнового электромагнитного механизма (рис. 2.17). В качестве статора I респонсина может быть использован обычный статор машины переменного тока. Обязательным условием является возможность создания в расточке статора вращающихся зон возбуждения магнитных полюсов. Число зон однозначно определяет число волн деформации в гибком звене. Для создания лучших условий прохождения магнитного потока полюсов служит гибкий дополнительный магнитопровод 2. Зубчатое колесо 3 с числом зубьев z_p встроено в статор I и составляет с ним единое целое. Число зубьев гибкого венца z_p отличается от числа зубьев жесткого колеса на одно или на два.

Обмотка статора представляет собой шестилучевую звезду с общей нулевой точкой O . Начала фаз звезды обозначены буквами A, B, C, D, E, F . Фазы между собой в пространстве сдвинуты на угол $\pi/3$, причем каждая из них состоит из двух секций, размещенных в диаметрально противоположных пазах статора. При отсутствии напряжения на зажимах A, B, C, D, E, F ротор располагается концентрически в расточке статора так, чтобы был равномерный воздушный зазор δ_0 . При подаче переменного на

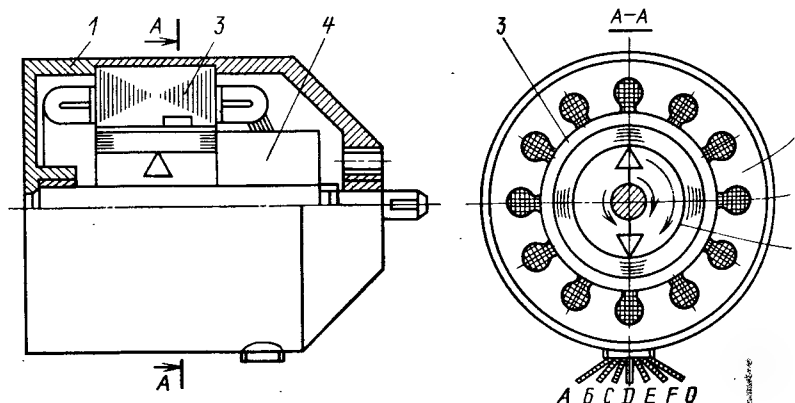


Рис. 2.17. Конструкция респонсинного двигателя

пряжения в обмотку статора появляются две диаметрально противоположные зоны возбуждения магнитных полюсов, вращающихся со скоростью ω_0 . Под действием механических сил F_a электромагнитного происхождения ротор деформируется в овал, и его зубчатый венец образует с зубчатым колесом статора две зоны волнового зацепления, также вращающиеся со скоростью ω_0 . При этом силы F_a преодолевают сопротивление потенциальных сил упругости, сил инерции подвижных масс ротора и сил трения в зацеплении, вызванных наличием момента сопротивления на валу M_c .

Вращение зон зацепления при наличии разности зубьев приведет к относительному угловому перемещению вала респонсина с частотой $\Omega = 2\omega_0/z_p$.

Конструкция торцевого респонсина отличается от цилиндрической своими малыми осевыми и сравнительно большими радиальными размерами. Один из разработанных приводов [15] имеет следующие характеристики: напряжение питающей сети $U = 220$ В; частота $f = 50$ Гц; напряжение питания респонсина $U_n = 18$ В; ток $I = 2$ А; номинальный вращающий момент $M_{ном} = 0,6$ Н·м; номинальная частота вращения $\Omega_n = 1,8$ рад/с; максимальная частота вращения $\Omega_{max} = 2,2$ рад/с; разрешающая способность $N = 1308$ шагов на оборот; число тактов на число волн равно шести; потребляемая мощность $S = 36$ В·А; полезная мощность $P_2 = 1,08$ Вт; энергетический фактор $\eta \cos \varphi$ не превышает 0,03.

Не выше энергетические характеристики и для приведенных в [15] двух модификаций макета торцевого респонсина (табл. 2.9): для первого макета $\eta \cos \varphi = 0,011 \div 0,05$, а для второго — 0,033. Для ВЭМ цилиндрического типа (табл. 2.10) приведенные данные позволяют определить массогабаритный показатель m' , равный 410 кг/кВт для типа 16-100-01 и 180 кг/кВт — для типа 16-100-5. У респонсинов типа НДМ соответствующие показатели (табл. 2.11) находятся в пределах

Таблица 2.9. Технические характеристики торцевого респонсина

Параметр	Модификация	
	1	2
Потребляемая мощность P_1 , Вт	60	60
Напряжение сети U , В	30	32
Частота f , Гц	100—300	100
Вращающий момент M , Н·м	0,35	0,638
Число фаз m	8	8
Частота вращения Ω , рад/с	0,314—0,942	0,314
Тормозной момент M_T , Н·м	1,17	3,73
Сопротивление фазы r , Ом	15	15
Шаг $\alpha_{ш}$	10,8	10,8

Таблица 2.10. Технические характеристики цилиндрического респонсина

Параметр	HDUM	
	16-100-01	16-100-5
Потребляемая мощность P_1 , Вт	30	30
Напряжение U , В	115	10
Частота f_1 , Гц	60	800
Вращающий момент M , Н·м	0,88	1,27
Число фаз m	1	8
Частота вращения Ω , рад/с	3,768	6,28
Тормозной момент $M_{тн}$, Н·м	2,65	2,25
Сопротивление фазы r , Ом	—	5
Шаг $a_{ш}$	—	0,45
Коэффициент полезного действия η	0,11	0,27
Масса m , кг	1,35	1,35

Таблица 2.11. Технические характеристики респонсинов типа HDM

Параметр	HDM-12-480-4	HDM-150-800-4	HDM-150-1600-8	HDM-150-2000-8	HDM-150-1000-4	HDM-1500-4	HDM-1500-4
Напряжение U , В	28	28	28	28	28	28	70
Потребляемая мощность P_1 , Вт	15	30	30	30	30	200	400
Ток I , А	2,4	3	1,5	1,5	3	28	10
Разрешающая способность N , шаг/об.	480	800	1600	2000	1000	800	800
Максимальная скорость $\Omega_{\max}$, рад/с	31,4	11,8	11,8	9,42	9,42	5,5	6,8
Вращающий момент M , Н·м	0,84	0,46	0,46	0,46	0,46	8,0	8,0
Полезная мощность P_2 , Вт	2,64	5,42	5,42	5,42	5,42	18,82	490
η	0,176	0,18	0,18	0,18	0,18	0,9	0,18
Масса m , кг	0,397	1,50	1,50	1,50	1,50	8,16	8,16
Удельная масса m' , кг/кВт	150	277	277	277	277	431	160

150—430 кг/кВт, что не слишком много для таких малых мощностей и небольших частот вращения.

Примеры промышленного применения респонсинов приведены в [15] и сводятся к приводу ведущих роликов бумажной ленты печатающего устройства, приводу координатографа и приводов ходовых винтов двухкоординатного фрезерного станка.

ЛИНЕЙНЫЕ И ДУГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

3.1. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ КАК ОСНОВА БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Развитие, которое получили в последнее время линейные электрические машины, позволяет считать их основой для создания безредукторного электропривода поступательного движения, а этот вид движения имеет место в 40—50% реальных приводов [13]. Известной альтернативой для короткоходовых приводов является электромагнитный электропривод, ниже будет показана существенная ограниченность областей рационального применения этого типа привода. Иногда включают в одну общую категорию дугостаторный и линейный электроприводы, объединяя их по общему признаку разомкнутости магнитной цепи индуктора (обычно это сравнение относится к асинхронным двигателям) и считая линейный двигатель частным случаем дугостаторного («дугового») при бесконечном радиусе дуги [103].

Рассмотрение истории возникновения этих двигателей, с одной стороны, и тенденций их развития, с другой стороны, позволяет считать такой подход необязательным. Действительно, патент Зедена 1902 г. на линейный электродвигатель [108], приводимый ниже, был, по-видимому, получен ранее, чем патенты на дугостаторные электрические машины. В тридцатые годы практически одновременно А. Г. Иосифьян создал первую отечественную конструкцию линейного асинхронного («магнитофугально-го») двигателя, экспонировавшегося в 1937 г. на Всемирной выставке в Нью-Йорке, а П. А. Фридкин — конструкции дугостаторных электродвигателей. Не будем поэтому устанавливать жесткую классификацию, бесспорно одно — линейный и дуговой электродвигатели создают близкие по типу безредукторные электроприводы. Рассмотрим основные варианты линейного электропривода [71].

В большинстве транспортных средств (тепловозах, электровагонах и т. п.) вращающиеся элементы электропривода перемещаются вместе с самим транспортным средством. Такой тип привода имеет свои специфические особенности и применяется в основном для больших поступательных перемещений. При проводимом ниже сравнительном рассмотрении характеристик ему больше всего соответствует линейный электропривод с размещением на транспортном средстве (экипаже) элементов, потребляющих от внешнего источника электрическую энергию, преобразуемую в механическую, этот тип привода будем называть прямой линейный электропривод или просто линейный электропривод.

Обращенный линейный электропривод, у которого указанные элементы не перемещаются вместе с транспортируемыми массами, а расположены неподвижно на пути, представляется правильным сравнивать с существующим электроприводом поступательно перемещающихся лент конвейеров, с многодвигательными приводами рольгангов прокатного стана для поступательного движения прокатываемых изделий, с приводом лебедок, шахтных подъемников, а также с приводами, обеспечивающими матовое поступательное перемещения кареток самопишущих приборов, дверей лифтов и т. п. В этом случае двигатель, обеспечивающий поступательное движение каких-либо масс, сам неподвижен.

Следующему типу современного электропривода с циклическим возвратно-поступательным движением — приводу строгальных или долбежных станков, компрессоров, электромолотков и т. п. — соответствует линейный электропривод с двигателем возвратно-поступательного движения, подвижная часть которого непосредственно связана с перемещаемыми массами. Именно циклический характер возвратно-поступательного движения является определяющим при выделении этого типа электропривода.

Одним из наиболее характерных применений линейного электропривода поступательного движения является тяговый электропривод транспортных средств. Если в рассмотренных в гл. 1 и 2 примерах безредукторных приводов определяющим являлось именно отсутствие редуктора, то у линейных тяговых приводов возникает новое свойство — изменяется сам характер создания поступательного движения.

У обычных транспортных приводов сила, создающая поступательное движение (сила тяги), образуется почти исключительно за счет сцепления колес с микровыступами. Сила тяги в этом случае определяется простым соотношением

$$F_T = gm\psi, \quad (3.1)$$

где F_T — сила тяги, реализуемая при сцеплении данного колеса (колесной пары, всех колес локомотива и т. п.) с путем; g — ускорение свободного падения ($g = 9,81$, м/с²); m — масса транспортного средства, приходящаяся на данное колесо (колесную пару и т. п.); mg обычно называется сцепным весом; ψ — коэффициент сцепления данного колеса с данным путем (или средний коэффициент сцепления данной колесной пары с путем).

Определяющее значение при этом имеет то обстоятельство, что предельное значение коэффициента сцепления ψ ограничено сверху критическим значением ψ_k , зависящим от большого числа случайных факторов [32]. Параметры кривой распределения ψ зависят от вида привода и от состояния рельсов.

Для современных отечественных электровозов при определении

нии ψ_k часто пользуются формулами, полученными по опытным данным Б. Н. Тихменевым: для $v \leq 45$ км/ч

$$\psi_k(v) = 0,235 + 10/(95 + 11v); \quad (3.2)$$

$$v = 45 \div 150 \text{ км/ч}$$

$$\psi_k = 0,08 + 95/(418 + 3v). \quad (3.3)$$

Это означает, что, например, при скорости в 150 км/ч расчетное значение ψ_k берется равным 0,19 и тяга современного электровоза со сцепной массой $m_n \approx 184$ т ни при какой мощности электродвигателей не может превысить значения $F_T \approx gm\psi_k \approx 3,5 \cdot 10^5$ Н; а при скорости $v = 100$ км/ч $\psi_k = 0,21$ и сила тяги $F_T \leq 3,85 \cdot 10^5$ Н.

В [62] приводится ряд нормативных формул для определения сопротивления движения разного вида составов при трогании и для современных скоростей движения. Примем для нашего иллюстративного расчета близкое к одной из таких формул выражение

$$F_T = (f' + f_v + \alpha) gm_n, \quad (3.4)$$

где α — угол подъема; f_v — коэффициент составляющей сопротивления движению, зависящий от скорости; m_n — масса поезда.

Для создания ускорения требуется дополнительная сила $F_a = m_n a$, где a — создаваемое ускорение. Для режима движения с ускорением (3.1) примет вид

$$F_T = [f' + f_v + \alpha + a/g] gm_n. \quad (3.5)$$

Используем для дальнейшего анализа понятие коэффициента полезной нагрузки $k_n = m_n/m_L$, где m_L — масса локомотива.

Тогда из (3.5) с учетом (3.1) имеем

$$k_n [f' + f_v + \alpha + a/g] = \psi \leq \psi_k.$$

Наибольшее значение этой основной оценки использования транспортного устройства

$$k_{n \max} \leq \frac{\psi_k}{f' + f_v + \alpha + a/g} \quad (3.6)$$

становится в такой же мере случайным значением, определенным лишь вероятностными характеристиками, как и значения ψ_k , f' и f_v . Но решающим фактором является разброс значений ψ_k , ибо f' , как уже указывалось, составляет лишь небольшую часть суммы в знаменателе выражения (3.6) и разброс его значений также меньше, чем ψ_k ; то же в определенной мере относится и к f_v .

Какое выбрать $k_{n \max}$, как загрузить данное транспортное устройство, как максимально использовать электропривод, имеющий промежуточное звено типа «сцепление микровыступами», — весьма важные для практики вопросы.

По экономическим соображениям чем больше цена отказа тем дальше от предельного значения надо брать расчетное значение ψ_k . При высокой цене отказа его следует принимать существенно меньше и математического ожидания ψ_k .

Необходимые расчетные соотношения могут быть получены при использовании метода «оптимума номинала», рассмотренного в [17], [67]. Результаты выполненных по этому методу расчетов нашли отражение на рис. 3.1, где по оси ординат отложены значения ψ_k , принимая которые можно обеспечить максимальную экономическую эффективность. Расчеты выполнены при следующих параметрах распределения ψ_k : математическое ожидание $M\psi_k = 0,39$; $\sigma = 0,06$; $\psi_{k \min} = 0,21$; $\psi_{k \max} = 0,51$. Как видно из графика, рабочее значение ψ_k невелико.

При определении коэффициента нагрузки при движении с малой скоростью на участке с углом подъема α имеем

$$k_{n1} = \psi_{k1} / (f' + a),$$

и, например, при $\alpha = 0,01$ и $f' = 0,002$ получаем $k_{n1} \approx 20$. Важно отметить физическое ограничение угла α , при котором возможно движение вообще, накладываемое данным значением ψ_{k1} . При $k_n = 1$ имеем

$$\sin \alpha = \psi_{k1} - f', \quad (3.7)$$

т. е. в нашем случае $\sin \alpha \leq 0,248$.

Никакой локомотив при принятом реальном $\psi_k = 0,25$ не сможет двигать самого себя на подъеме в $14-15^\circ$ при любой сцепной массе и любой мощности своих двигателей. Этот физический предел может показаться далеким для специалистов в области магистрального железнодорожного транспорта, где в настоящее время эксплуатируются на порядок менее крутые подъемы, но для промышленного, особенно карьерного транспорта это насущная задача ближайшего будущего. Добыча полезных ископаемых из глубоких карьеров открытым способом получает все большее распространение и возможность использовать уклон вывозной траншеи, например, в 15° и еще круче (вместо существующих сейчас предельных $2-3^\circ$) имеет кардинальное значение. Существенное ограничение допустимых подъемов при строительстве новых железных дорог весьма повышает их стоимость, особенно при прохождении сложного рельефа.

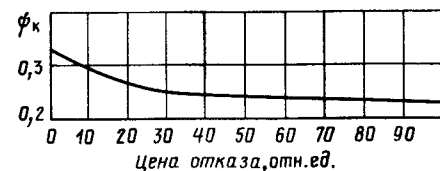


Рис. 3.1. График для определения оптимального значения расчетного коэффициента сцепления

При определении коэффициента нагрузки, допустимого для обеспечения заданного ускорения a на горизонтальном участке при небольшой скорости, имеем из (3.6) при $f_v = 0$ и $\alpha = 0$:

$$K_{n2} = \psi_k / (f' + a/g). \quad (3.8)$$

Для получения минимального пути разгона следует добиваться наибольшего ускорения a , допустимого из соображений прочности, безопасности или комфорта для пассажирского поезда. Но легко показать, что, как и при предельном подъеме, существует физическое ограничение и для ускорения. Никакой локомотив с любой сцепной массой и любой мощностью двигателей не может превысить ускорения

$$a \leq (\psi_k - f') g,$$

что непосредственно следует из (3.8) при $K_n = 1$.

Приведем для сравнения из [56] значения максимальных ускорений для автомобилей: $2,0-2,5 \text{ м/с}^2$ — для легковых машин; $1,7-2,0 \text{ м/с}^2$ — для грузовых и $1,8-2,4 \text{ м/с}^2$ — для автобусов (в 8 раз больше, чем принято в нашем последнем примере для поезда), но все же $a/g \leq 0,25$, так как и здесь лимитирует значение ψ_k . Возможность создания больших ускорений у линейного электропривода (особенно у второго типа — обращенного линейного электропривода), в том числе $a > g$, и, следовательно, возможность обеспечения как малых времен и участков разгона, так и движения на любых подъемах, вплоть до вертикали, является серьезным принципиальным преимуществом линейного безредукторного электропривода.

Для общего случая движения со скоростью v , углом наклона α и ускорением a коэффициент нагрузки определяется по формуле

$$K_n = \frac{\psi_k(v)}{f' + f_v + a + a/g} \approx \frac{30}{(100 + 3,6v)(f_v + a + a/g)}. \quad (3.9)$$

Используя нормативную формулу из [62]

$$f_v = 3,6 \cdot 10^{-5} v (1,2 + 0,108v), \quad (3.10)$$

получаем кубическое уравнение относительно скорости:

$$v^3 + 39v^2 + 257 [1,2 + 10^3 (\alpha + a/g)] v + 72 \cdot 10^5 (\alpha + a/g) - 22 \cdot 10^5 / K_n = 0. \quad (3.11)$$

Результаты решения этого уравнения (значения единственных действительных корней) для различных значений параметров α и K_n при $a = 0$ даны в табл. 3.1.

Как видно из табл. 3.1, при $K_n = 1$, $\alpha = 0$, $a = 0$ предельная скорость довольно велика. Возможно, здесь сказалось допущение о приемлемости выражения (3.3) для высоких скоростей: при

Таблица 3.1. Значения предельных скоростей

K_n	1	1	1	5	5	10
$a, \text{ м/с}^2$	0	1	2	0	0,1	0
$v, \text{ км/ч}$	425	165	50	230	45	170

сколько-нибудь заметной нагрузке ($K_n = 5$) и $a = 0$, $a = 0$ $v \leq 230 \text{ км/ч}$.

Таким образом, создание высокоскоростного транспорта ($v = 450 \div 500 \text{ км/ч}$) невозможно при обычном редукторном электроприводе на базе использования сцепления колесо-рельс. При увеличении полезной нагрузки физически реализуемая предельная скорость резко падает. Так, если при $K_n = 5$, $v = 230 \text{ км/ч}$, то при $K_n = 10$ предельное значение установившейся скорости на горизонтальном пути составит лишь 170 км/ч .

В начале 70-х годов на рельсовом пути была достигнута скорость $376,5 \text{ км/ч}$ в Пуэбло (США) при использовании ЛАД мощностью 1840 кВт , массой 2470 км , при зазоре $\delta \approx 0,04 \text{ м}$, $\tau \approx 0,48 \text{ м}$, длине индуктора $L_{\text{инд}} = 3,835 \text{ м}$, пусковом усилии $F_{\text{пуск}} = 40 \text{ кН}$, $F_{\text{ном}} = 17 \text{ кН}$.

Высокоскоростной наземный транспорт может опираться на рельсы, но двигаться по ним он может только с линейным тяговым безредукторным приводом.

Промежуточное положение между высокоскоростным и низкоскоростным линейными электроприводами занимает комбинированная тяга: на локомотиве устанавливается дополнительно обычный двигатель, создающим тягу благодаря сцеплению колеса с рельсами, линейный безредукторный электропривод, включаемый в качестве усилителя тяги на подъемах. При использовании комбинированной тяги удастся повысить эффективность действия и обычных двигателей. Благодаря созданию линейного двигателя кроме тягового усилия еще и заметного усилия притяжения формулу (3.1) следует несколько изменить, записав для предельного по коэффициенту сцепления ψ_k режима

$$F_T = (gm + F_n) \psi_k, \quad (3.12)$$

где F_n — дополнительное усилие притяжения локомотива (к лесной пары и т. п.) к рельсам, вызванное действием линейного электродвигателя. Таким образом, результирующая сила тяги комбинированного электропривода с линейным усилителем тяги

$$F_T = F_{T, \text{л}} + (gm + F_n) \psi_k, \quad (3.13)$$

где первое слагаемое $F_{T, \text{л}}$ — сила тяги, развиваемая непосредственно линейным двигателем, а второе слагаемое — сила тяги, создаваемая обычными двигателями (при условии, что она ограничена у этих двигателей при реализуемой на подъеме скорости

только предельным коэффициентом сцепления ψ_k). Материалы по комбинированному электроприводе для усилителя тяги рассмотрены в [71]; сдерживает его реальное применение отсутствие преобразователя, удовлетворительного по надежности, массогабаритным показателям, стоимости, малым воздействиям на линии связи. Созданные в последние годы мощные транзисторы позволяют, по-видимому, преодолеть и это препятствие.

Анализ реальных достаточно напряженных направлений магистральных железных дорог страны позволяет выявить еще одну характерную особенность применения линейного электропривода в качестве усилителя тяги на подъемах — это особые условия работы такого привода. Подъемы, на которых целесообразна его установка, относительно коротки: время работы двигателя $t_{\text{вкл}}$ относительно приведенной тепловой постоянной времени T мало, а интервал между ними $t_{\text{выкл}}$ — достаточно велик. При длительной работе машины основной заботой конструктора является создание хороших условий ее охлаждения, т. е. достижение существенного значения произведения $\alpha_v S$, где α_v — коэффициент отдачи тепла с поверхности S при скорости обдува v , ибо установившаяся температура перегрева поверхности $\theta_\infty = \Delta P / \alpha_v S$, где ΔP — мощность потерь.

Рассмотрим зависимость нагревания тела от $\alpha_v S$ за малое время t для случая, когда текущее значение температуры перегрева

$$\theta_t = \theta_\infty (1 - e^{-t/T}) = \frac{\Delta P}{\alpha_v S} (1 - e^{-t/T}), \quad (3.14)$$

$$T = \frac{(mc)_{\text{экв}} \theta_\infty}{\Delta P} = \frac{(mc)_{\text{экв}}}{\alpha_v S}, \quad (3.15)$$

где $(mc)_{\text{экв}} = \sum_i m_i c_i$ — эквивалентная теплоемкость компонентов тела с массами m_i и удельными теплоемкостями c_i . Разложим $e^{-t/T}$ в ряд:

$$e^{-t/T} = 1 - \frac{t}{T} + \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^2}{2!} - \dots$$

Уже при $t/T \leq 0,05 \div 0,08$ погрешность меньше 0,5%, если ограничиться первыми двумя членами. Впрочем, для разности $1 - e^{-t/T}$ погрешность при этом может достигать 3—4%. Тогда

$$\theta_t = \frac{\Delta P}{\alpha_v S} \frac{t}{T} = t \frac{\Delta P}{\alpha_v S} \frac{\alpha_v S}{(mc)_{\text{экв}}},$$

или, точнее,

$$\theta_t \leq t \frac{\Delta P}{(mc)_{\text{экв}}}, \quad (3.16)$$

ибо любое значение α_v и S , отличное от нуля, дает некоторое снижение θ_t — уравнение (3.16) есть уравнение нагрева тела при полном отсутствии теплоотдачи; расчет проведен по касательной

к начальной части кривой нагрева по (3.14). Проиллюстрируем это положение численным примером с данными того же порядка, что в расчетах реальных модулей линейных двигателей усилителя тяги: $P_2 = 300$ кВт; $\eta = 0,75$; $\Delta P = 100$ кВт = $10 \cdot 10^4$ Вт; $S = 2,5$ м²; масса меди $m_m = 200$ кг; масса стали $m_{ст} = 400$ кг; $\sum mc = 200 \cdot 390 + 400 \cdot 480 = 27 \cdot 10^4$ Дж/с (с учетом изоляции берем $(mc)_{э\text{кв}} = 30 \cdot 10^4$ Дж/°С); $\Delta P(mc)_{э\text{кв}} = 0,333$. Ведем расчет для трех режимов: $t_1 = 150$ с; $t_2 = 300$ с; $t_3 = 450$ с.

По (3.16) имеем

$$\begin{aligned}\theta_{t1} &= 2,5 \cdot 60 \cdot 0,333 = 49,95^\circ \text{ C}; \\ \theta_{t2} &= 5 \cdot 60 \cdot 0,333 = 99,9^\circ \text{ C}; \\ \theta_{t3} &= 7,5 \cdot 60 \cdot 0,333 = 149,8^\circ \text{ C}.\end{aligned}$$

Проверим по более точной формуле (3.14) для двух значений $\alpha_v = 20$ (Вт/м²) · °С и $\alpha_v = 100$ (Вт/м²) · °С:

$$1) \alpha_v = 20 \text{ (Вт/м}^2\text{)} \cdot ^\circ\text{C}; \quad T = \frac{mc}{\alpha_v S} = \frac{30 \cdot 10^4}{20 \cdot 1,5} = 10^4 \text{ с};$$

$$\theta_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha_v S} = \frac{10 \cdot 10^4}{20 \cdot 1,5} = 3333^\circ \text{ C (но машина после 7,5 мин отключается)}$$

$$\theta_{t1} = 3333(1 - e^{-150/10^4}) = 3333(1 - 0,985) = 49,9^\circ \text{ C};$$

$$\theta_{t2} = 3333(1 - e^{-300/10^4}) = 3333(1 - 0,970) = 99,9^\circ \text{ C};$$

$$\theta_{t3} = 3333(1 - e^{-450/10^4}) = 3333(1 - 0,956) = 146,6^\circ \text{ C};$$

$$2) \alpha = 100 \text{ (Вт/м}^2\text{)} \cdot ^\circ\text{C}; \quad T = 2 \cdot 10^3 \text{ с}; \quad \theta_\infty = \frac{10 \cdot 10^4}{100 \cdot 1,5} = 666^\circ \text{ C};$$

$$\theta_{t1} = 666(1 - e^{-150/2 \cdot 10^3}) = 666(1 - 0,928) = 47,9^\circ \text{ C};$$

$$\theta_{t2} = 666(1 - e^{-300/2 \cdot 10^3}) = 666(1 - 0,861) = 92,6^\circ \text{ C};$$

$$\theta_{t3} = 666(1 - e^{-450/2 \cdot 10^3}) = 666(1 - 0,798) = 134,5^\circ \text{ C}.$$

В упомянутых выше направлениях время движения, превышающее 7,5 мин (450 с), имеет место реже чем в 5% подъемов в подавляющем большинстве случаев требуется время менее 5 мин.

Линейный двигатель может быть выполнен в виде герметично закрытой, малообдуваемой конструкции — затраты на достижение больших $\alpha_v S$ представляются в свете изложенного неразумными.

Приведем еще некоторые данные по сравнению динамических свойств привода движущейся тележки с вращающимся электроприводом и с линейным электроприводом [4]. Здесь существенным является влияние моментов инерции вращающихся элементов и динамические свойства транспортируемых тяговых приводов вращающимися двигателями. В суммарную массу поступательно перемещающегося транспортного средства входит масса привода во всех видах систем с транспортируемыми двигателями как вращающимися, так и с линейными приводными двигателями.

Однако в первом случае, когда в режиме разгона нужно еще раскрутить роторы двигателей и шестерни редукторов, к фактической суммарной массе m_d нужно добавить эквивалентную массу

$$m_{э\text{кв}} = \sum_1^k \frac{J_i}{R^2} = \frac{1}{R^2} \sum_1^k J_i,$$

где k — число вращающихся элементов; J_i — полярный момент инерции, приведенный к колесу с радиусом катания R .

Если обозначить через безразмерный коэффициент $\gamma = m_{э\text{кв}}/m$ отношение дополнительной эквивалентной массы к массе транспортного средства (включающей также фактическую массу вращающихся элементов привода), то реальное ускорение для привода с вращающимися двигателями

$$a_v = \frac{F_t - F_c}{m(1 + \gamma)} < \frac{F_t - F_c}{m} = a_d. \quad (3.17)$$

Для приближенного определения значения γ при тяговых расчетах в [4] рекомендуется формула вида

$$\gamma = 0,6 \frac{m_*}{m}, \quad (3.18)$$

где m_* — масса вращающихся элементов; m — масса данного типа подвижного состава.

Для оценки варианта линейного электропривода, использующего опору вращающегося колеса на рельсы, воспользуемся опытными данными по определению значения γ , приведенными в [4] для груженых вагонов и электровозов (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Опытные значения коэффициента инерции вращающихся масс для различных типов подвижного состава [4]

Тип подвижного состава	γ_1 («как повозки»)	γ_2 («как машины»)	$\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$
Двухосный грузовой вагон, груженный	0,042	—	—
Четырехосный грузовой вагон, груженный	0,028	—	—
Четырехосный пассажирский вагон	0,042	—	—
Электровоз ВЛ-22	0,054	0,188	0,134
Электровоз ВЛ-23	0,048	0,178	0,13

Можно приближенно принять, что для создания равной силы тяги на автосцепке электровоза потребуется примерно одинаковая масса электропривода с линейными двигателями и электропривода с вращающимися двигателями. Ниже будет сказано, что при учете массы редуктора это вполне выполнимо.

Основной динамический параметр привода — реализуемое ускорение будет для линейного привода электровоза, не использующего опоры на рельсы (с магнитной или воздушной подушкой), примерно на 18%, а для линейного привода электровоза, исполь-

зующего опору на рельсы (с вращающимися колесами), примерно на 13% больше, чем для привода с вращающимися двигателями. Нас чаще интересуют динамические свойства самого привода — ускорение на единицу силы тяги, отнесенное к массе привода. Если учесть, что масса элементов привода составляет примерно 25% массы локомотива, то можно сделать вывод, что динамические свойства самого привода за счет исключения его вращающихся элементов могут быть улучшены в 1,5 раза и более. И еще одно замечание, относящееся к сравнению КПД обычного электропривода с механическим сцеплением и линейного, бесконтактного (в смысле механического сцепления) электропривода. Взаимодействие сцепляющихся микровыступами поверхностей в первом случае ведет как к нагреву этих поверхностей, так и к их своеобразной «обдирке» — отрыву частиц с поверхности колеса и рельса (шоссе). Единственным источником энергии для того и другого является в режиме тяги только энергия электропривода. Обычно КПД такого электропривода определяется в виде

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{ред}}, \quad (3.19)$$

где $\eta_{\text{п}}$ — КПД преобразователя, включенного между источником питания (например, контактной сетью) и электродвигателем, здесь учитываются и потери в устройствах управления и регулирования; $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя, для тяговых двигателей локомотивов он довольно высок (например, для двигателя НБ 406 А — около 0,92); $\eta_{\text{ред}}$ — КПД редуктора ($\eta_{\text{ред}} = 0,95 \div 0,96$).

При таком расчете КПД системы привода от контактного провода до обода ведущего колеса не учитываются потери как на нагревание трущихся поверхностей вследствие упругих деформаций в слоях сцепления, так и на создание остаточных деформаций в этих слоях и особенно на отрыв механических частиц. Эти потери можно оценить примерно в 10—15% полной мощности локомотива [71].

Выше в основном рассмотрены данные по сцеплению и трению колеса о рельс, характерные для современного железнодорожного транспорта. Для автомобильного транспорта возникают лишь количественные отличия; ограничения, вносимые коэффициентом сцепления, имеют место и здесь. Для количественного анализа этих ограничений можно воспользоваться данными, приведенными в [44].

Значения коэффициента сцепления ψ_k и коэффициента трения f_1 принимаются для бетонного сухого шоссе (автостреды) $\psi_k = 0,69$, $f_1 = 0,01$; мокрого шоссе $\psi_k = 0,5$, $f_1 = 0,05$; щебеночного мокрого шоссе $\psi_k = 0,3$; $f_1 = 0,03$.

Весьма существенный разброс этих значений определяется состоянием самого шоссе (наличие выбоин, например, может повысить коэффициент трения до значения $f_1 = 0,13$) и, конечно, состоянием поверхности колеса — на гладкой резине лучше

предпринимать путешествий по горным дорогам. В целом разброс данных для пары колесо автомобиля — шоссе еще больше, чем для пары колесо локомотива (вагона) — рельс. Расчеты для случая автомобиля — шоссе ведутся по формулам, аналогичным приведенным выше, с учетом того обстоятельства, что здесь gm_n есть нагрузка, приходящаяся на ведущие колеса, а gm_n — общий вес автопоезда. Образование дорожной пыли — бетонной, асфальтовой и резиновой (от истирания колес), осколков щебенки и т. п. не только снижает срок эксплуатации шоссе и автомобиля, но и является видимым свидетельством снижения реального КПД тягового привода автомобиля.

Здесь уместно указать, что именно ведущие колеса, особенно на подъеме, при разгоне и торможении, создают основную часть воздействия как при истирании трущихся поверхностей, так и в снижении КПД тягового устройства. Действительно, работа сил сцепления ведущих колес при этом в несколько раз (во многих случаях — на порядок) больше, чем суммарная сила трения всех ведомых колес — во столько же раз, во сколько суммарная сила тяги, идущая на преодоление подъема и (или) ускорения, а также сопротивления воздуха, больше, чем приведенное сопротивление трения колес состава; по нормативам тяговых расчетов [62] последняя величина примерно 2,5 Н на каждую тонну массы состава, тогда как сопротивление воздуха, например, при $v = 20$ м/с дает по (3.10) примерно такое же значение, а подъем в 10% — значение в 4 раз большее. Грубо приближенно можно сказать, что введение бесконтактной тяги (линейный двигатель на локомотиве) устранил $5/6$ истирания трущихся поверхностей и снижения КПД; введение, кроме того, «бесконтактного опирания» (подвески всего состава) устранил еще только $1/6$ этих последствий и потребует дополнительной системы поперечной стабилизации состава, роль которой при опирании колес на рельсы выполняют реборды колес. Мы не разбираем в данной книге вопросы подвески, которую слишком часто неразрывно связывают с линейным тяговым электроприводом. Укажем лишь, что при рекомендации безредукторного тягового электропривода для железных (рельсовых) дорог можно опирание на рельсы (и центрирование ребордами колес) оставить. Итак, для того чтобы войти в будущее, поезда не обязательно должны сойти с рельсов...

3.2. ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Основными типами линейных двигателей являются асинхронные (ЛАД) и синхронные (ЛСД), из которых следует выделить группу автосинхронных двигателей, обычно называемых двигателями постоянного тока (ЛДПТ). Следует указать на определенную условность подразделения линейных электродвигателей на асинхронные, синхронные и постоянного тока при комплектации

зующего опору на рельсы (с вращающимися колесами), примерно на 13% больше, чем для привода с вращающимися двигателями. Нас чаще интересуют динамические свойства самого привода — ускорение на единицу силы тяги, отнесенное к массе привода. Если учесть, что масса элементов привода составляет примерно 25% массы локомотива, то можно сделать вывод, что динамические свойства самого привода за счет исключения его вращающихся элементов могут быть улучшены в 1,5 раза и более. И еще одно замечание, относящееся к сравнению КПД обычного электропривода с механическим сцеплением и линейного, бесконтактного (в смысле механического сцепления) электропривода. Взаимодействие сцепляющихся микровыступами поверхностей в первом случае ведет как к нагреву этих поверхностей, так и к их своеобразной «обдирке» — отрыву частиц с поверхности колеса и рельса (шоссе). Единственным источником энергии для того и другого является в режиме тяги только энергия электропривода. Обычно КПД такого электропривода определяется в виде

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{ред}}, \quad (3.19)$$

где $\eta_{\text{п}}$ — КПД преобразователя, включенного между источником питания (например, контактной сетью) и электродвигателем, здесь учитываются и потери в устройствах управления и регулирования; $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя, для тяговых двигателей локомотивов он довольно высок (например, для двигателя НБ 406 А — около 0,92); $\eta_{\text{ред}}$ — КПД редуктора ($\eta_{\text{ред}} = 0,95 \div 0,96$).

При таком расчете КПД системы привода от контактного провода до обода ведущего колеса не учитываются потери как на нагревание трущихся поверхностей вследствие упругих деформаций в слоях сцепления, так и на создание остаточных деформаций в этих слоях и особенно на отрыв механических частиц. Эти потери можно оценить примерно в 10—15% полной мощности локомотива [71].

Выше в основном рассмотрены данные по сцеплению и трению колеса о рельс, характерные для современного железнодорожного транспорта. Для автомобильного транспорта возникают лишь количественные отличия; ограничения, вносимые коэффициентом сцепления, имеют место и здесь. Для количественного анализа этих ограничений можно воспользоваться данными, приведенными в [44].

Значения коэффициента сцепления ψ_k и коэффициента трения f_1 принимаются для бетонного сухого шоссе (автостреды) $\psi_k = 0,69$, $f_1 = 0,01$; мокрого шоссе $\psi_k = 0,5$, $f_1 = 0,05$; щебеночного мокрого шоссе $\psi_k = 0,3$; $f_1 = 0,03$.

Весьма существенный разброс этих значений определяется состоянием самого шоссе (наличие выбоин, например, может повысить коэффициент трения до значения $f_1 = 0,13$) и, конечно, состоянием поверхности колеса — на гладкой резине лучше не

предпринимать путешествий по горным дорогам. В целом разброс данных для пары колесо автомобиля — шоссе еще больше, чем для пары колесо локомотива (вагона) — рельс. Расчеты для случая автомобиля — шоссе ведутся по формулам, аналогичным приведенным выше, с учетом того обстоятельства, что здесь gm_d есть нагрузка, приходящаяся на ведущие колеса, а gm_n — общий вес автопоезда. Образование дорожной пыли — бетонной, асфальтовой и резиновой (от истирания колес), осколков щебенки и т. п. не только снижает срок эксплуатации шоссе и автомобиля, но и является видимым свидетельством снижения реального КПД тягового привода автомобиля.

Здесь уместно указать, что именно ведущие колеса, особенно на подъеме, при разгоне и торможении, создают основную часть воздействия как при истирании трущихся поверхностей, так и в снижении КПД тягового устройства. Действительно, работа сил сцепления ведущих колес при этом в несколько раз (во многих случаях — на порядок) больше, чем суммарная сила трения всех ведомых колес — во столько же раз, во сколько суммарная сила тяги, идущая на преодоление подъема и (или) ускорения, а также сопротивления воздуха, больше, чем приведенное сопротивление трения колес состава; по нормативам тяговых расчетов [62] последняя величина примерно 2,5 Н на каждую тонну массы состава, тогда как сопротивление воздуха, например, при $v = 20$ м/с дает по (3.10) примерно такое же значение, а подъем в 10% — значение в 4 раз большее. Грубо приближенно можно сказать, что введение бесконтактной тяги (линейный двигатель на локомотиве) устранит $\frac{5}{6}$ истирания трущихся поверхностей и снижения КПД; введение, кроме того, «бесконтактного опирания» (подвески всего состава) устранит еще только $\frac{1}{6}$ этих последствий и потребует дополнительной системы поперечной стабилизации состава, роль которой при опирании колес на рельсы выполняют реборды колес. Мы не разбираем в данной книге вопросы подвески, которую слишком часто неразрывно связывают с линейным тяговым электроприводом. Укажем лишь, что при рекомендации безредукторного тягового электропривода для железных (рельсовых) дорог можно опирание на рельсы (и центрирование ребордами колес) оставить. Итак, для того чтобы войти в будущее, поезда не обязательно должны сойти с рельсов...

3.2. ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Основными типами линейных двигателей являются асинхронные (ЛАД) и синхронные (ЛСД), из которых следует выделить группу автосинхронных двигателей, обычно называемых двигателями постоянного тока (ЛДПТ). Следует указать на определенную условность подразделения линейных электродвигателей на асинхронные, синхронные и постоянного тока при комплектации

приводов близкими по типу коммутаторами — преобразователями питающими близкие по типу обмотки, расположенные в одинаковых пазах и охватываемые проходящими по однопольным магнитным проводам магнитными потоками. Будем далее относить это различие к режимам работы системы. Электроприводом с линейным двигателем постоянного тока будем называть привод, механическая и регулировочная характеристики которого идентичны характеристикам коллекторной машины постоянного тока.

Синхронным будем называть привод, у которого полезное усилие имеет место только при заданной частоте питания $f = v/2\tau$, где v — скорость линейного движения; τ — длина полюсного деления. Асинхронным будем называть привод, у которого именно при этом соотношении (или вытекающим из него $v = 2\tau f$) вообще нет полезного усилия. Тип машины не связан с тем, подается ли на вход преобразователя системы постоянный или переменный ток и имеются ли во вторичной части замкнутые контуры с током или явно выраженные полюсы. В качестве основы для анализа будем применять фундаментальные положения электротехники, учитывая трудности использования обычных формул классической теории электрических машин.

В своей принципиальной основе линейные асинхронные двигатели (рис. 3.2) опираются на патент Зедена от 2 июня 1902 г. (англ. патент № 12581). В описании изобретения сказано: «Изобретение относится к устройствам для приведения в движение железнодорожных экипажей, лифтов, возвратно-поступательных частей машин, станков и других приспособлений посредством движущегося (бегущего) магнитного поля. В применении к железным дорогам магнит (индуктор), возбуждаемый трехфазным или иным током, устанавливается на экипаже вблизи от рельса (полосы), который играет роль короткозамкнутого якоря многофазного двигателя. Полоса может быть выполнена из стали либо из стали и латуни или другого металла, и в ней для экономии массы и

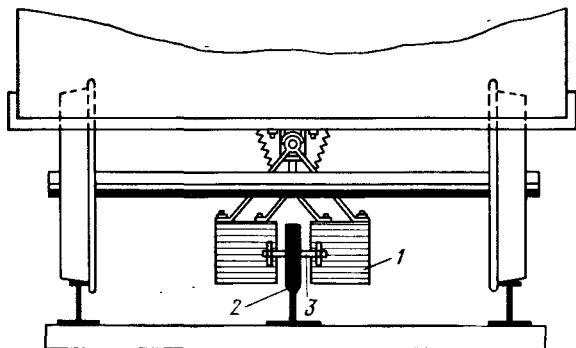


Рис. 3.2. Линейный асинхронный двигатель по патенту Зедена в 1902 г.

регулирования тока проделаны отверстия (перфорации) различной ширины — для обеспечения пуска экипажа и т. п. Магниты (индукторы) могут быть установлены над или под полосой для увеличения сцепления или частичной компенсации массы экипажа. Они могут быть расположены с противоположных сторон полосы либо электромагнит (индуктор) может быть расположен с одной стороны полосы, а шихтованный пакет стали — с другой. Устройство может быть таким, что силы уравниваются или не уравниваются. В случае лифта, например, индукторы направлены наружу для взаимодействия с двумя направляющими полосами».

Линейным асинхронным машинам посвящено большое количество публикаций, в том числе и отечественных. Это весьма популярная в последние годы тема диссертаций — кандидатских и докторских. Лет 20 действует специализированное конструкторское бюро, работают по всей стране десятки групп и лабораторий. Тем не менее нет на наших заводах серийного выпуска таких машин — количество защищенных диссертаций намного превышает количество — не серий, а экземпляров таких машин, успешно работающих в промышленности или выпущенных на серийном заводе.

Усовершенствованные конструкции линейного асинхронного двигателя подробно описаны в [30]. На рис. 3.3 показан построенный в ОКБ линейных двигателей при Киевском заводе электро-транспорта им. Дзержинского тяговый линейный электродвигатель, предназначенный для вагона монорельсовой дороги. Этот двусторонний линейный электродвигатель имеет следующие технические данные:

Напряжения питания U , В	380
Номинальный ток I , А	200
Частота f , Гц	50
Максимальная сила тяги F , Н	3800
Скорость двигателя v , м/с	10,2
Коэффициент полезного действия η	0,5
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,4
Коэффициент использования подводимой полной мощности $\eta \cos \varphi$	0,2
Размеры индуктора:	
длина l_n , мм	1260
ширина b_n , мм	210

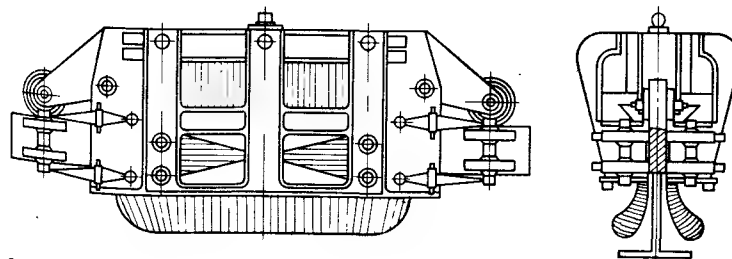


Рис. 3.3. Линейный асинхронный двигатель для вагона монорельсовых дорог

Реактивная полоса с размерами, мм	
Воздушный зазор между индуктором и реактивной полосой, мм	
Количество пазов	
Размеры паза:	
высота, мм	
ширина, мм	

По приведенным данным можно оценить еще один характерный параметр использования линейных двигателей — отношение силы тяги к полной площади рабочего зазора, $K_F = F/s_{\text{общ}}$. Считая $s_{\text{общ}} = 2l_n b_n = 5,3 \cdot 10^3 \text{ см}^2$, имеем $K_{F\text{max}} = 3800/5300 \approx 0,7 \text{ Н/см}$. Выпускаются мелкими и средними сериями линейные асинхронные двигатели в странах СЭВ. На рис. 3.4 показана конструктивная схема линейных электродвигателей (типа ЛИД-ММ 14/3,8, ЛИД-ТС 150/8,4), выпускаемых в НРБ [109]. Их технические данные приведены в табл. 3.3. Это односторонние машины с вторичной частью типа «сэндвич»: на обращенной к индуктору поверхности массивной стальной полосы 2 закреплена алюминиевая полоса (3). При этом следует еще учесть и то, что машины эти предназначены для кратковременной работы (например, для типа ЛИД-ММ 13/3,8 ПВ равно 15% при 30 включениях в час).

Таблица 3.3. Технические данные двигателей, выпускаемых в НРБ

Параметр	ЛИД-ММ 14/3,8	ЛИД-ТС 150/8,4
Тяговое усилие при пуске F_p , Н	140	1500
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В	380	380
Номинальный ток I , А	5,0	49
Частота f , Гц	50	50
Потребляемая мощность W , кВт	1,4	20
Линейная синхронная скорость v_c , м/с	3,8	8,4
Масса индуктора m , кг	14	43
КПД	0,1	0,16
$\cos \varphi$	0,38	0,625
Энергетический фактор $\eta \cos \varphi$	0,04	0,1

Ряд полезных расчетных соотношений для относительно тихих машин приводится в [8]. Из условия половинного заполнения пазов крайних полюсов и пропорциональности между силой и квадратом индукции (или квадратом числа витков w) выводятся значение коэффициента снижения эффективности индуктора $\alpha: \alpha = (2p - 1,5)/2p$. Снижение эффективности при четырех

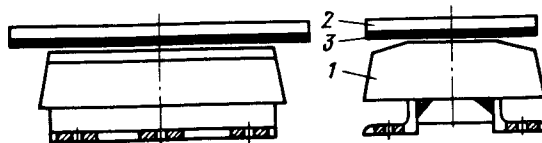


Рис. 3.4. Конструктивная схема линейных электродвигателей, выпускаемых в НРБ

210×45
3
60
50
11,5

полюсной машине 37,5%, при шестиполюсной — 25%, при десятиполюсной — 15%. Поскольку увеличение числа полюсов при одном и том же большом зазоре уменьшает весьма существенное для использования машины отношение τ/δ возможности выбора числа полюсов довольно ограничены. Исследования на большом числе выполненных машин показали существенное снижение коэффициента использования полезной площади воздушного зазора (при данных электромагнитных нагрузках, определяемых произведением линейной нагрузки A на индукцию в зазоре B_δ) при увеличении этого зазора, особенно для малых синхронных скоростей (малых значений τ/δ).

На рис. 3.5 зазор δ_1 соответствует базовому значению 10 мм. Если учесть, что при $f = 50$ Гц значения синхронных скоростей $v_c = 3; 6; 12$ м/с достигаются соответственно при $\tau = 30; 60; 120$ мм, то неудивительно, что для $\delta = 4\delta_1$ машина при синхронной скорости $v_c = 3$ м/с используется в 2,5 раза хуже, чем при $v_c = 12$ м/с.

В [8] приведены кривые максимальных значений КПД двигателей для разных зазоров при различных синхронных скоростях. При не очень большом зазоре в 10—12 мм (выше указывалась необходимость и в зазорах около 50—100 мм) уже при $v_c = 6$ м/с $\eta < 0,4$, а $\eta \cos \varphi < 0,1$.

Подробные сведения по применению этих двигателей для низких скоростей и инженерная методика их расчета даны в [53]. Разбираются в основном односторонние ЛАД с шихтованной или массивной вторичной частью. Шихтованная вторичная часть состоит из алюминиевых пластинок толщиной 3 мм, скрепленных с пластинами из стали толщиной 6 мм. Опытным определено наилучшее соотношение между шириной электропроводящего элемента части b_1 и шириной магнитопроводного элемента b_m для создания наибольшей силы как

$$b_2 = b_m + 2\tau/\pi. \quad (3.20)$$

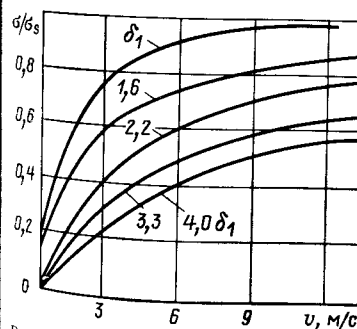


Рис. 3.5. Относительный коэффициент использования двигателя в зависимости от синхронной скорости

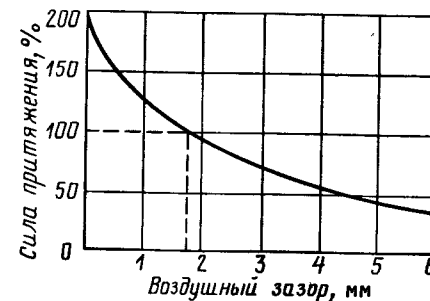


Рис. 3.6. Зависимость силы притяжения от воздушного зазора

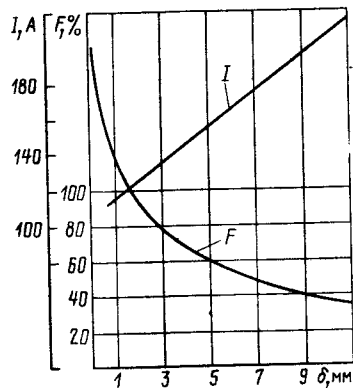


Рис. 3.7. Зависимость усилия и тока от воздушного зазора

Односторонние ЛАД со стальными массивными вторичными частями нашли применение в диапазоне скоростей 0,7—1,5 м/с, например, для привода мелких механизмов. Такой односторонний ЛАД имеет нормальную силу притяжения между первичными и вторичными частями. Нормальная сила может в 10 раз превышать усилие тяги. Характерное изменение нормальной силы от воздушного зазора показано на рис. 3.6.

Типичные характеристики низкоскоростных промышленных плоских ЛАД показаны на рис. 3.7—3.9. ЛАД используется для натяжения алюминиевой полосы. Усилие ЛАД, направленное против движения полосы, дает возможность избежать повреждения поверхности. Алюминиевая полоса выполняет роль вторичной части для девяти ЛАД. Толщина алюминиевой полосы 0,5—1,4 мм и каждый ЛАД создает усилие 60 Н.

Для горизонтального перемещения используется ЛАД в конвейерах. Для угольного конвейера первичные части можно располагать на расстоянии до 3 м. Воздушный зазор составляет около 0,5 см, и первичная часть питается током с частотой 10 Гц. ЛАД имеет пусковое усилие 8,4 кН и длительное усилие 4 кН.

Плоский ЛАД длиной 21 см и шириной 9 см используется для автоматического открывания дверей. Плоский ЛАД может служить также для поднятия труб на сталелитейных заводах. Теория двусторонних ЛАД подробно разобрана в [106]. Рассматривают

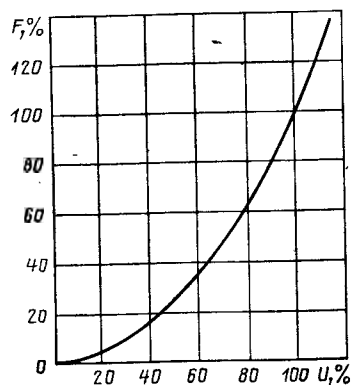


Рис. 3.8. Зависимость усилия от линейного напряжения

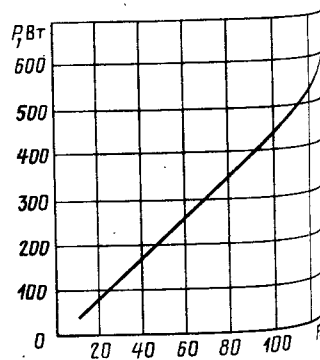
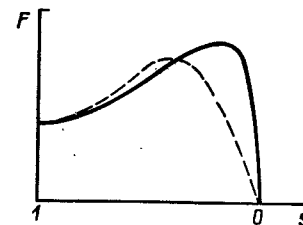


Рис. 3.9. Зависимость усилия от подводимой мощности

Рис. 3.10. Механические характеристики ЛАД



как низкоскоростные машины, для которых магнитное число Рейнольдса $\frac{\mu_0 v^2}{4\pi\sigma} \leq 1$, так и высокоскоростные, для которых $\frac{\mu_0 v^2}{4\pi\sigma} \gg 1$; здесь v — линейная скорость; σ — удельное объемное сопротивление вторичного элемента.

Влияние концевой эффекта иллюстрируется рис. 3.10 для машины высокоскоростной (пунктирные кривые) и низкоскоростной (сплошные кривые). Уменьшение вторичного сопротивления r_2 успешно достигается введением короткозамкнутых контуров во вторичную часть машины [65]. Исследовались машины ЛАД-1 (натуральный образец) и ЛАД-3 (расчет) для конвейерных поездов, а также ЛАД-2 для привода межцеховой транспортной системы. Установка короткозамкнутых контуров вместо реактивной шины позволила практически удвоить мощность в одних и тех же габаритных размерах (с 0,88 до 1,65 кВт — у ЛАД-1 и с 46,2 до 100 кВт у ЛАД-3 при $v_c \approx 6 \div 6,3$ м/с) и увеличить ее примерно в 1,5 раза — с 8,5 до 12,5 кВт у ЛАД-2 при $v_c = 10$ м/с. Результаты исследования указанных машин, а также экспериментальной модели с короткозамкнутыми контурами приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Характеристики ЛАД

Характеристики	ЛАД-1	ЛАД-2	Модель
P , кВт	$\frac{1,65^*}{0,88}$	$\frac{12,5}{8,5}$	0,35
F , кН	$\frac{0,26^*}{0,14}$	$\frac{1,25}{0,85}$	0,063
v , м/с	6,3*	10	7,4
λ , о.е.	0,3	0,24	0,25
A , (А/м ²) · 10 ⁴	1,2*	2,25	1,6
η , о.е.	$\frac{0,51^*}{0,48}$	$\frac{0,61}{0,59}$	0,46
$\cos \varphi$	$\frac{0,6^*}{0,38}$	$\frac{0,57}{0,4}$	0,45

Продолжение табл. 3.4

Характеристики	ЛАД-1	ЛАД-2	Модель
$\eta \cos \varphi$	$\frac{0,3^*}{0,18}$	$\frac{0,35}{0,24}$	0,21
δ , мм	5	5	3,1
$b \times l$, м	$0,1 \times 0,73$	$0,6 \times 1,52$	—
$2p$	8	9	4
m' , кг/кВт	48,5	20	85,7

* Экспериментальные данные.

В [45] при введении понятия «добротность машины» указано, что сила, развиваемая в машине, равна произведению тока I на магнитный поток Φ , в свою очередь ток создается напряжением U , а поток — током I_m , поэтому произведение отношений I/U и Φ/I_m является мерой качества машины. Добротность G определяется как

$$G = k \frac{I}{U} \frac{\Phi}{I_m},$$

где k — коэффициент пропорциональности. Замечая, что $I/U = 1/R$ (проводимость), а $\Phi/I_m = L$ (индуктивность), получаем

$$G = k \frac{L}{R}.$$

Для машины переменного тока, в которой скорость пропорциональна угловой частоте ω , а мощность равна произведению силы на скорость, получаем для G выражение

$$G = \omega L / R,$$

где коэффициент пропорциональности выбран равным единице. Добротность индукционной поступательной машины с листовым элементом оказывается равной

$$G = \frac{2\mu_0 f p^2}{\pi g q},$$

где f — частота; p — полюсный шаг; g — ширина зазора; q — удельное поверхностное сопротивление вторичного элемента. Очевидно, что при большой ширине зазора добротность машины можно увеличить, увеличивая полюсный шаг. В цитате сохраняем обозначения и индексацию первоисточника.

Покажем некоторую неабсолютность такого обязывающего названия, как добротность, и его определенную неуниверсальность относительно типов машин и режимов их работы [72].

Действительно, во-первых, равенство $I/U = 1/R$ справедливо только, например, для машин постоянного тока в пусковом режиме. Далее если принять, что $E = I\omega L = c_m \Phi \omega$, то $\Phi/I = L/c_m$

Пусть $I_m = I$, как у машины постоянного тока с последовательным возбуждением. Тогда для режима пуска действительно имеем

$$G = k \frac{I}{U} \frac{\Phi}{I_m} = k \frac{1}{R} \frac{L}{c_m} = k \frac{2\pi a}{pN} T_z.$$

Для простой петлевой обмотки, например, когда $a = p$, имеем

$$G = k \frac{2\pi}{N} T_z.$$

Тогда для повышения добротности требуется увеличение T_z , а при этом ухудшаются динамические показатели машины. Впрочем, и введение множителя ω вместо k еще обостряет противоречие между таким значением добротности и динамическими показателями, ибо, если электромеханическая постоянная времени в разбираемом случае $T_m = \omega \frac{J}{M_{np}}$, то $\omega = T_m \frac{M_{np}}{J}$ и

$$G = \frac{M_{np}}{J} T_m T_z = D T_m T_z,$$

принятая для приводов добротность D (представляющая собой угловое ускорение привода в рад/с² — чем оно больше, тем лучше динамические показатели) умножается на постоянные времени, каждая из которых при увеличении ухудшает динамические показатели.

Вопросы теории, методики расчета, конструкции линейных электрических машин, как уже указывалось, освещены в многочисленных отечественных и зарубежных изданиях. Значительное внимание этим вопросам уделяют и реферативные журналы, например, в обзоре «Итоги науки и техники» [1], а также в [71] даются соответствующие обширные библиографические данные. Но следует указать, что прогнозы широкого внедрения этих машин, завершения создания на их базе в 80-е годы нашего столетия высокоскоростного наземного транспорта сейчас, в конце указанного десятилетия, реализованы лишь в малой степени. В публикации реферативного журнала «Электрические машины и трансформаторы» № 10 за 1986 г. [10] по материалам трудов состоявшейся в Лондоне конференции института инженеров-механиков (июнь 1985 г.), рассмотревшей современное состояние и перспективы применения линейных электродвигателей, приводятся данные о ЛАД с тяговой силой (на единицу площади активной зоны) от 0,3 до 0,6 Н/см², сообщается о различных устройствах с ЛД. В Ванкувере, Скарборо (Канада) и Детройте (США) действуют колесные транспортные системы с ЛАД, разработанные Canadien Urban Transportation Development Corp. совместно с Metro Canada и испытанные на полигоне в Кингстоне (Канада). Пропускная способность систем от 12 до 20 тыс. пассажиров. Питание ЛАД от инверторов, максимальная тяговая сила 16 кН, максимальное произведение $\eta \cos \varphi = 0,4$. В аэропорту

Бирмингема (Великобритания) действует транспортная установка с магнитным подвесом, разработанная BR Research и изготовленная совместно фирмами GEC, Brush, Metro Camel и др. Эта установка питается от инвертора, имеет максимальную тягу 4 кН, скорость 54 км/ч, $\eta \cos \varphi = 0,22$. Три установки с ЛАД и магнитным подвесом изготовлены в Японии. Две из них высокоскоростные (100 и 300 км/ч), третья использовалась на Экспо-83 для перевозки пассажиров (по 48 в вагоне) со скоростью 30 км/ч. В ФРГ ведутся работы по синхронному ЛД (ЛСД); с 1973 г. ведется разработка ЛСД с магнитным подвесом и с возбуждением от постоянных магнитов (испытательный центр в Браунштейне). Аналогичный транспорт с ЛСД разрабатывается с 1979 г. в Эмсланде. Проект предусматривает изготовление пути длиной 31 км. Опытный образец вагона Transrapid-06 имеет длину 54,2 м, вес 122 т (на 192 пассажира), возбуждение от электромагнитов. Транспорт с ЛСД разработан в Японии. Здесь предусматривается электродинамический подвес с использованием сверхпроводников. Основные работы по транспортным ЛД сейчас сосредоточены в ФРГ и Японии. Для высокоскоростного транспорта более перспективными считаются ЛСД, для малых скоростей ЛАД. Но, как уже указывалось выше, при малых скоростях у ЛАД весьма низкие энергетические и массогабаритные показатели.

Подробный анализ затруднений, реально возникающих при попытках использования ЛАД, дан на примере их применения в качестве электропривода подъемно-транспортных машин в [49]. Указано на принципиальные преимущества такого безредукторного электропривода: из кинематической схемы исключается редуктор, а усилие передается непосредственно на рабочие органы машины (раму тележки, тяговый орган и т. д.), имеется принципиальная возможность полного устранения механической связи между устройствами для перемещения груза и направляющими, тяговое усилие может быть равномерно распределено вдоль всей кинематической цепи; ленты и металлические конструкции оказываются принципиально осуществимыми в конструкции подъемно-транспортных машин с непосредственным силовым воздействием на канаты, стрелки, тележки, кабины, тормозные колодки и т. д. Но автор [49] на основе большого материала экспериментальных проверок, изучения опыта расчетов и конструирования ЛАД у нас в стране и за рубежом весьма сдержанно относится к возможностям их широкого применения во всяком случае в рассматриваемой области техники. В качестве основного препятствия отмечается тот факт, что при конструктивно достижимых размерах полюсного деления электродвигателя, питании его от сети трехфазного тока 50 Гц и сохранении приемлемых энергетических показателей до сих пор не удалось достигнуть нужной скорости перемещения грузов (2—3 м/с). Снижение скорости даже до 5 м/с (что требуется иногда для

конвейеров и передвижения тележек перегружателей) возможно лишь при использовании преобразователей частоты, стоимость которых в несколько раз превышает стоимость традиционного электропривода и снимаемых частей механизмов, а увеличение числа элементов привода снижает надежность. Нелегко обеспечить сохранение достаточно малых воздушных зазоров между индукторами и реактивной шиной и надежно устранить зацепление между ними. Приводятся данные испытаний во Всесоюзном научно-исследовательском институте подъемно-транспортного машиностроения тележечного конвейера с линейным асинхронным двигателем, изготовленным в Киевском политехническом институте и использующем два индуктора и вертикальные алюминиевые шины. Испытания проводились при частоте 20 и 50 Гц. Из-за большого скольжения (примерно 0,6—0,7 уже при $f=20$ Гц) при нагрузке 1270—1570 Н были получены скорости 0,9—2 м/с, КПД снижался до 0,13, $\cos \varphi = 0,33 \div 0,49$ т. е. энергетический фактор был примерно 0,06. Автор делает вывод о целесообразности ориентировать применение ЛАД для приводов, предназначенных для кратковременной работы с большими перерывами, для таких приводов, где низкие энергетические показатели не имеют большого значения, например для управления тормозами (вместо электрогидротолкателей и т. п.), перевода стрелок, открывания и закрывания заслонок бункеров и др. В гл. 4 будет показано, что для решения как этих частных задач, так и более общих, определенные преимущества перед ЛАД имеют машины двойного движения поступательного типа и преобразователи движения. Выше показана рациональность введения короткозамкнутых контуров во вторичную часть ЛАД. По исследованиям, проведенным проф. В. А. Винокуровым и др., дальнейшее улучшение параметров ЛАД возможно при введении в эти контуры компенсирующих емкостей [14]. В этой работе приведены результаты анализа обращенного варианта ЛАД с размещением реактивной шины на экипаже для разного числа N экипажей на участке и разной длины l_n участка. Можно указать, что лучшие показатели имеет ЛАД с большей длиной реактивной шины. Отмечается, что приведенные в табл. 3.5 показатели для двигателя с фазной реактивной шиной и включением конденсаторов во вторичную цепь получены для конкретных значений вторичных параметров, что не позволяет сделать полное заключение об их возможных оптимальных значениях. Существенное влияние оказывает интенсификация охлаждения, позволяющая улучшить массогабаритные показатели за счет повышения плотности тока: в [14] показано, что при повышении J_2 с 5 до 20 А/мм² m' снижается в 1,5 раза.

При достаточно протяженной вторичной части ЛАД рекомендуемое в [14] введение в обмотку машины компенсирующих емкостей технически не очень просто выполнить. Здесь существенным было бы использовать возможность расположения на

экипаже как первичной, так и вторичной обмоток ЛАД, что предлагалось в [71] и [104] для вращающихся электрических машин. Приведем некоторые данные из [104], где показывается, что индукторный асинхронный двигатель (сокращенно ИАД) по сравнению с обычным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором обладает рядом существенных преимуществ, к числу которых следует отнести: а) возможность управления двигателем путем изменения параметров вторичной цепи без использования щеток и колец; б) большие возможности увеличения числа пар полюсов, что позволяет рассчитывать эти двигатели на питание от источников высокой частоты или на малую синхронную частоту вращения при обычной частоте питания.

Представляет определенный интерес рассмотрение линейного асинхронного двигателя с сосредоточенными первичными обмотками и расположенными вдоль пути ферромагнитным рельсом или полосой [71]. Для повышения надежности, введения возможности регулирования скорости и момента, существенного уменьшения вредных краевых эффектов и снижения расхода токопроводящих материалов магнитопроводы, располагаемые вдоль пути, выполняются переменнo-полюсными, а фазные обмотки статора укреплены на тележке со смещением относительно друг друга приблизительно на 90° — для двухфазной, 120° — для трехфазной и вообще на $360^\circ/m$ — для машины с любым числом фаз m , больших двух. За 360° принимается расстояние вдоль пути, соответствующее расстоянию между осями одноименных полюсов магнитопровода пути. Вторичная обмотка располагается в пакетах стали упомянутых фаз на тележке и соединяется во всех фазах последовательно.

На рис. 3.11, а представлен продольный разрез машины в трехфазном исполнении. Магнитный поток, возникающий при подаче питания в обмотку возбуждения 1, проходит по магнито-

Таблица 3.5. Энергетические показатели обращенного варианта ЛАД

Число экипажей N		η при l , равной			$\cos \varphi$ при $l = 1$ км	P , МВт	Q , МВАр
		1 км	2,5 км	5 км			
1	1	0,0926	0,0394	0,02	0,0135	21,59	1600
	2	0,21	0,097	0,0543	0,0555	9,52	171,2
	3	0,25	0,125	0,075	0,72	—	—
5	1	0,331	0,1685	0,093	0,0158	30,21	1912
	2	0,552	0,343	0,21	0,065	18,11	278,7
	3	0,61	0,37	0,25	0,083	—	—
10	1	0,488	0,285	0,1685	0,0188	40,98	127,9
	2	0,692	0,501	0,343	0,0165	28,9	377,8
	3	0,74	0,562	0,385	0,092	—	—

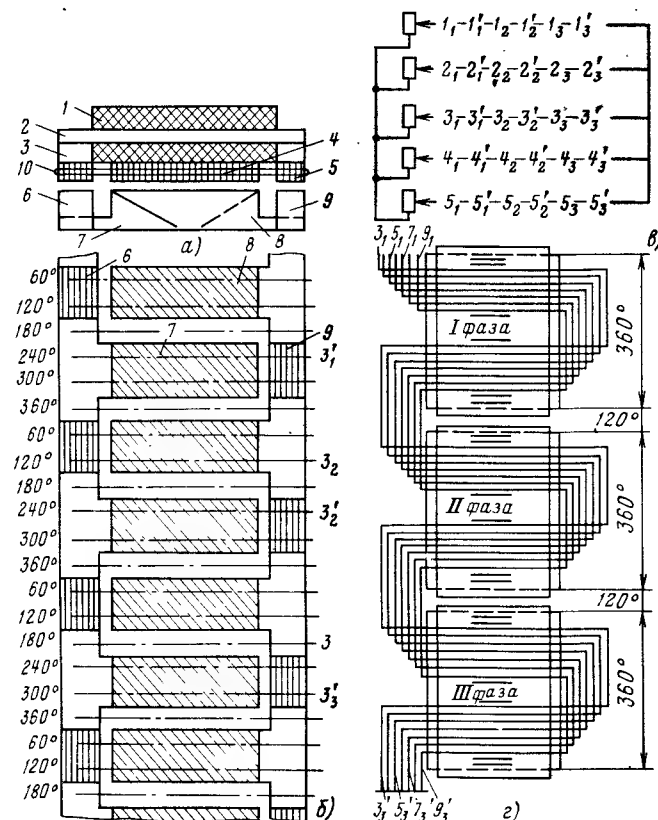


Рис. 3.11. Линейная асинхронная машина с расположением первичной и вторичной обмоток на подвижной тележке

проводу 2 в левую часть статора 3, через воздушный зазор попадает в левый полюс пути 6, затем — в соединенный с ним средний полюс 7, снова через воздушный зазор попадает в среднюю часть статора 4, из нее через воздушный зазор в другой средний полюс пути 8, соединенный с ним правый полюс пути 9 и снова через воздушный зазор проходит в правую часть статора 5 и замыкается через магнитопровод статора 2, четыре раза пересекая вторичную обмотку 10. В других фазах магнитный поток проходит тот же путь.

Взаимодействие магнитного потока с током, возникающим в статорных обмотках, создает тяговое усилие, заставляющее тележку двигаться.

На рис. 3.11, б представлен вид сверху магнитопроводов пути. В этом варианте магнитопроводы пути не связаны магнитно с рельсами, и их размеры зависят только от конструкции машины.

На рис. 3.11, а дана схема выведения статорных вторичных обмоток на пускорегулирующие реостаты. На рис. 3.11, б приведена схема статорных вторичных обмоток. По-видимому, в целях удешевления магнитопроводы пути практически могут выполняться нешихтованными. Как для этого варианта, так и для других машин с безобмоточными полюсами на пути представляет также интерес использование для путевых магнитопроводов соответствующих пресс-порошков.

В качестве левой и правой частей магнитопроводов пути можно использовать существующие рельсы. В этом случае вторичная обмотка на тележке будет занимать только среднюю часть статора, а рабочая часть магнитопроводов пути будет представлять собой переменную-полюсную структуру, левая часть которой магнитно связана с левым рельсом, а правая часть — с правым рельсом аналогично структуре на рис. 3.11, б.

Выполнение магнитопроводов по рис. 3.11 и наличие возможности переключения вторичных проводов на тележке и смещения статора поперек тележки позволяют также (при различном сочетании поднятых и опущенных участков левой и правой частей полюсов пути) получить эффект изменения числа полюсов.

Такую машину можно использовать в генераторном или тормозном режиме, но особенно ценным представляется использование ее в качестве двигателя для тяги при однофазном питании и обеспечении временного сдвига фаз с помощью известных высоковольтных фазосдвигающих устройств, так как сосредоточенные обмотки предлагаемой машины можно выполнить практически на любое напряжение, в том числе в кожухе с трансформаторным маслом. Следует отметить, что выполнение путевой структуры по рис. 3.11, б позволяет взаимодействовать с ней как с первичным системам синхронного (в том числе автосинхронного постоянного тока) типа, так и с первичным системам асинхронного типа. Это обстоятельство может существенно удешевить работу на этапах отработки, сравнения в эксплуатационных условиях и выбора окончательного варианта или вариантов систем линейного электропривода, особенно для тяги на железнодорожном транспорте. Выполнение обмоток индуктора сосредоточенными позволит существенно повысить их надежность.

В качестве существенно улучшенного варианта линейного асинхронного двигателя в [59] рассматривается так называемый линейный двигатель Жана Гембаля с V-образной двухслойной реактивной шиной 1 (рис. 3.12), охватывающей индуктор 2, и токопроводящим экраном 3, служащим также для крепления индуктора. Сравнительные испытания этого двигателя проводились Научно-исследовательским институтом транспорта в Витри (Франция) на круглом стенде. При скорости 180 км/ч и воздушном зазоре 20 мм измерения произведения $\eta \cos \varphi$ дали следующие результаты: 0,19 для двигателя фирмы «Эрликон» с двухслойным

якорем ($\eta = 0,77$; $\cos \varphi = 0,25$); 0,22 для двигателя фирмы «Жемон-Шнейдер» со стальным якорем ($\eta = 0,34$; $\cos \varphi = 0,65$); 0,50 для двигателя Гембаля с двухслойным V-образным якорем ($\eta = 0,70$; $\cos \varphi = 0,71$).

Наряду с этим отмечается наличие очень больших плотностей тока у двигателя Гембаля при обычных плотностях тока у двух других двигателей.

Полученные результаты представляются закономерными — большой охват индуктора и экранирование значительной части его потока рассеяния должны были улучшить энергетические показатели машины. Но именно этот принцип выполнения лишает возможности использовать машину на существующих линиях железнодорожного транспорта, где установка двухсторонней и тем более цилиндрической конструкции ЛАД не позволяет пропускать обычный подвижной состав.

Практическая значимость возможного использования с минимальными переделками существующего верхнего строения пути железных дорог привела к другому крайнему решению — вообще не делать специальной реактивной шины, используя для этой цели существующие железнодорожные рельсы [18]. В Киевском политехническом институте разработан и в Киевском ОКБ ЛД изготовлен такой рельсовый линейный асинхронный двигатель РеЛАД. Для проведения полигонных испытаний тележка с двигателями была оборудована двумя токоприемниками, применяемыми в метро, а на все ходовые колеса поставлены щеточные контакты. Двухфазное питание подводилось по контактным рельсам, расположенным по обе стороны от ходовых, а однофазное — по обоим ходовым рельсам.

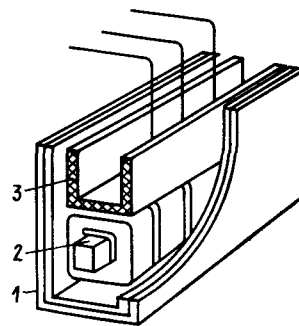
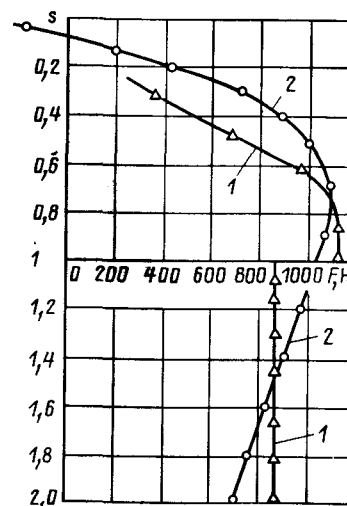


Рис. 3.12. Схема двигателя Гембаля

Рис. 3.13. Механическая характеристика ЛАД: 1 — экспериментальная; 2 — расчетная



Испытания проводились при следующих параметрах двигателя и сети: полюсное деление $\tau = 0,132$ м, воздушный зазор $\delta = 0,004$ м, ширина индуктора $b_1 = 0,1$ м, ширина головки рельса $b_2 = 0,07$ м, число пар полюсов $p = 4$, активное сопротивление рассеяния $x_1 = 0,76$ Ом, реактивная полоса — рельс типа Р65, напряжение сети $U_1 = 380$ В, частота сети $f_1 = 50$ Гц. Пусковой фазный ток на два двигателя $I_1 = 200$ А, активная потребляемая мощность $P_1 = 48$ кВт. Определение механической характеристики производилось по способу кино съемки разгона, выбега и торможения противовключением.

В результате проведенных испытаний помимо механической характеристики были определены следующие величины: полная потребляемая мощность $S_1 = 132$ кВт·А, коэффициент мощности при пуске $\cos \varphi_{\text{пуск}} = 0,364$, пусковая электромагнитная мощность $P_{2 \text{ пуск}} = 29$ кВт, пусковой электромагнитный КПД $\eta_{\text{эм.п}} = 0,605$.

По исходным данным эксперимента произведен расчет механической характеристики одного РеЛАД, а также изменение нормальной силы, потребляемой мощности, тока, индукции в зазоре в функции от скольжения. Сравнение экспериментальной и расчетной механических характеристик показало хорошую сходимость (рис. 3.13).

Рассмотрение механической характеристики и данных двигателя позволяет оценить $v_{\text{ном}} \approx 7$ м/с и $F_{\text{ном}} = 500$ Н, т. е. $P_2 = 3,5$ кВт, и, соответственно, $\eta \cos \varphi = 0,03$; для такой скорости этот показатель меньше, чем у линейного двигателя с обычной реактивной шиной при тех же воздушных зазорах (до 5—7 мм), но при этом возникает существенное преимущество — отсутствие необходимости в специальной вторичной части.

Это может в ряде случаев оказаться решающим с экономической и эксплуатационной точек зрения. К сожалению, требуемое трехфазное питание не позволяет использовать имеющиеся системы энергоснабжения — оборудование дополнительных контактных рельсов может серьезно сузить область применения такого решения. Возможно, что такой привод будет наилучшим образом использован для автономных локомотивов — в этом случае не требуется специального токоподвода, и простота выполнения и применения РеЛАД могут быть полностью использованы.

Цилиндрические линейные асинхронные двигатели (ЦЛАД) получили определенное развитие для относительно короткоходовых низкоскоростных приводов. Так, в Новосибирском электротехническом институте [11,43] были разработаны трехфазные ЦЛАД с полюсным делением 5—7 мм, что позволяет получить синхронную скорость примерно 0,6 м/с. В этой конструкции (рис. 3.14) применены пластинчатые спиральные катушки малой толщины на статоре и ферромагнитный сердечник, на который насажены чередующиеся между собой медные и ферромагнитные кольца. В [43] рекомендуются такие ЦЛАД для привода раз-

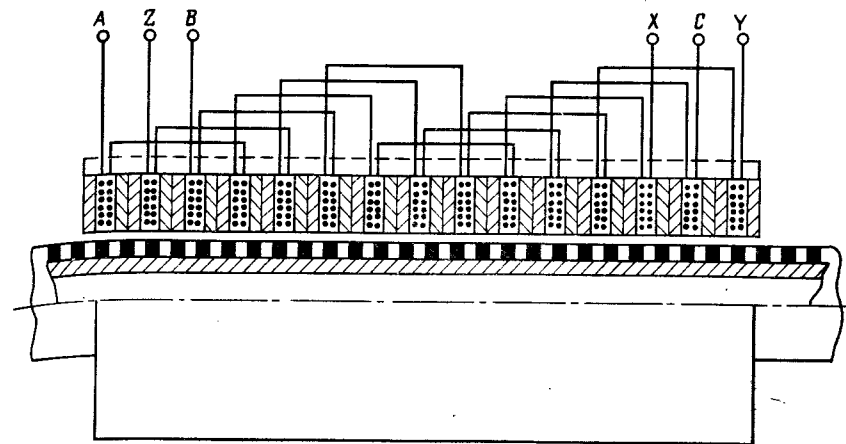


Рис. 3.14. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель

движных дверей; фрамуг цехов и теплиц; автоматических стрелок; сортировочных устройств; шиберов, рычагов, толкателей, кареток автоматизированных устройств.

Технические характеристики одного из изготовленных двигателей: масса двигателя 9,9 кг, рабочий ход 360 мм, трехфазное питание напряжением 220/380 В, частотой 50 Гц, режим работы ПВ=25% или ПВ=100%, пусковое усилие 240 Н или 120 Н, синхронная скорость 0,58 м/с, пусковое усилие, приходящееся на 1 см² активной поверхности, 1,17 Н/см² или 0,585 Н/см², рабочее усилие, приходящееся на 1 см² активной поверхности, 0,73 или 0,365 Н, масса, отнесенная к рабочему усилию при ПВ=100%, 81,7 кг/кН, энергетический фактор $\eta \cos \varphi$ при ПВ=100%—0,01, полная потребленная мощность 2,4 кВт·А, масса, отнесенная к полезной мощности при ПВ=100%, $m' = 392$ кг/кВт.

Механическая характеристика приведена на рис. 3.13. Показатели для ПВ=100%, необходимые для сравнения с другими двигателями, пересчитаны нами исходя из того, что $F_{\text{ПВ } 100\%} \approx 0,5 F_{\text{ПВ } 25\%}$.

Общие тенденции развития линейных, в основном асинхронных машин и ряд полезных замечаний по выбору привода поступательного перемещения даны в [60, 61] и др. Любопытно отметить, что при известном преобладании общего числа публикаций в нашей стране имеет место относительно более низкая доля патентов (соответственно — авторских свидетельств) в публикациях — 20% в СССР, против, например, 51% в США и 48% в Японии. По мнению автора обзора [60], это связано с большим практическим применением этих двигателей в соответствующих странах.

3.3. ЛИНЕЙНЫЕ СИНХРОННЫЕ И АВТОСИНХРОННЫЕ (ПОСТОЯННОГО ТОКА) ДВИГАТЕЛИ ЛСД И ЛАСД (ЛДПТ)

Различие между синхронными и автосинхронными (далее везде постоянного тока) двигателями в основном в характере коммутации. В определенном смысле синхронными являются также линейные шаговые двигатели, у которых в установившемся режиме движения подвижный элемент шагового двигателя синхронно следует за перемещением подвижного элемента коммутатора. Исходя из этой концепции в одном из первых авторских свидетельств по бесколлекторным автосинхронным двигателям [73] с приоритетом от 26 января 1944 г. был защищен принцип построения таких машин путем установки на оси приемника с заданным сдвигом датчика следящей системы с усилением момента. В области создания линейных шаговых двигателей в Советском Союзе сделан целый ряд фундаментальных изобретений и разработок. Эти разработки широко реализованы и описаны в [23—29].

Выше неоднократно указывалось на целесообразность (по соображениям экономичности и надежности) выполнять вторичную часть двигателя безобмоточной, отказавшись от размещения на ней обмотки возбуждения и тем более компенсационной обмотки и добавочных полюсов. В этих условиях особое внимание должно быть уделено правильному выбору преобразователя-коммутатора. Существенны трудности, связанные с использованием тиристорного или аналогичного преобразователя и практической неприемлемостью использования развернутого коллектора на пути. Это заставило вспомнить (или снова изобрести) предложенный в 1957 г. [70] коллекторный электрический двигатель, у которого коллектор не имеет механической связи с ротором и снабжен вращающимися щетками, отличающийся тем, что в нем щетки и ротор связаны при помощи электрической синхронной передачи. По этому авторскому свидетельству предусматривалось также введение регуляторов в систему синхронной связи и трансформаторов (в цепь коллектор — якорь) для улучшения коммутации. Предложен был и электромашинный агрегат с указанным двигателем, отличающийся тем, что к коллектору двигателя электрически присоединяются обмотки статоров нескольких электрических машин. Такой отделенный коллектор можно поместить в благоприятную среду. В 1971—1972 гг. нами была разработана и исследована экспериментальная установка, у которой для синхронной связи использовалась сельсинная система с совмещенным сельсином-двигателем, но для транспортных линейных приводов такую систему трудно рекомендовать даже при полной плавности хода и высокой точности следования щеток за смещением секции первичной части двигателя относительно оси полюсов вторичной части.

Действительно, при этом практически сохраняются все функциональные части преобразователя-коммутатора — датчик положения, циклическая система включения выходных ключей, но их мощность существенно (примерно в 20 раз при помещении коллектора в газовую среду и примерно в 10 раз — в жидкостную) снижается. Это снижение мощности ключей приводит к введению дополнительного двигателя с системой плавной отработки выходных сигналов упомянутых ключей и двойной системы щеток, скользящих по коллектору и подающих ток на эти щетки с дополнительных колец питания, и, наконец, механического коллектора в герметично закрытой установке с введением туда питания и вывода кабеля связи коллектор—якорь. Но самым существенным является тот факт, что некоторое улучшение коммутации (в реально выполненных машинах с коллектором в благоприятной среде это улучшение не очень значительное) уже при скоростях движения примерно 10—20 м/с в упомянутых условиях (отсутствие добавочных полюсов и, соответственно, коммутирующей ЭДС e_k , относительно большой индукции поперечной реакции якоря B_{aq} и др.) не может обеспечить необходимого качества работы коллекторного коммутатора.

Как известно, для тяговых машин (см., например, [63]) нескомпенсированная часть e_r составляет примерно 0,1—0,18 реактивной ЭДС, допустимое значение которой не должно превышать 8 В, т. е. при отсутствии добавочных полюсов e_r не должно превышать 0,8—1,5 В. Пусть в благоприятных условиях можно допустить $e_r + e_{aq} = 3 \div 4$ В, где e_{aq} вызывается наличием B_{aq} . Тогда используем известную формулу

$$e_r + e_{aq} = 2w_c l_1 v_a (A \xi_c + B_{aq}), \quad (3.21)$$

где w_c — число витков у коммутируемой секции; l_1 — активная длина проводника (у линейной машины — ширина активной части b); v_a — линейная скорость якоря (соответственно — линейная скорость движения v); A — линейная нагрузка; ξ_c — эквивалентная магнитная проводимость.

У линейных машин с безобмоточной вторичной частью индукция реакции якоря в зазоре зоны коммутации $B_{aq} \approx (0,25 \div 0,3) A \xi_r$, т. е.

$$e_r + e_{aq} \approx 2,5 w_c b v A \xi_c, \quad (3.22)$$

сила тяги линейного двигателя

$$F = \alpha_i B_\delta A (1 - K) b L, \quad (3.23)$$

где α_i — расчетная относительная полюсная дуга; B_δ — индукция, создаваемая возбуждением над полюсом; L — активная длина машины; K учитывает снижение тяги, вызванное конструктивными особенностями двигателя.

Для нашей приближенной оценки можно принять $K = 0,2$;

$\alpha_i B_\delta = 0,25$ Тл (из-за значительных зазоров у транспортных машин трудно обеспечить высокое значение $B_{cp} = \alpha_i B_\delta$). Тогда

$$F = 0,2AbL. \quad (3.24)$$

Принято оценивать качество линейного двигателя по удельной тяге:

$$F' = \alpha_i B_\delta A (1 - K). \quad (3.25)$$

Не менее характерной величиной, особенно для линейных двигателей, располагаемых на экипаже, где при жестко ограниченной длине требуется значительная тяга, является тяга, отнесенная к единице длины машины,

$$F'' = F/L = \alpha_i B_\delta Ab (1 - K). \quad (3.26)$$

Для принятых величин

$$F'' = 0,2Ab. \quad (3.27)$$

У современных мощных локомотивов длиной примерно 30 м сила тяги составляет 40 т ($4 \cdot 10^5$ Н). Для размещения линейных двигателей затруднительно использовать более чем 2/3 общей длины локомотива, т. е. $\sum L_{л.д} \approx 20$ м и $F'' \approx 4 \cdot 10^5 / 20 = 2 \cdot 10^4$ Н/м, а из (3.27) $Ab = 10^5$. Подставим эту величину в (3.22):

$$e_r + e_{aq} = 2,5w_c \cdot 10^5 \xi_r. \quad (3.28)$$

Причем, как это имеет место для ряда обычных машин, $\xi_r = 6 \cdot 10^{-6}$ (реально из-за использования у линейных машин относительно более глубоких пазов эта величина будет большей).

Примем также, что используются одновитковые секции для оценки минимально возможного значения некомпенсированной ЭДС. Тогда $e_r + e_{aq} = 1,5v$ и принятое выше предельное значение $e_r + e_{aq} \leq 3$ В может иметь место лишь при $v \leq 2$ м/с.

Можно записать в общем виде значение удельной некомпенсированной ЭДС на 1 м/с скорости движения, используя (3.28) и (3.23):

$$\frac{e_r + e_{aq}}{v} = 2,5w_c \frac{F''}{\alpha_i B_\delta (1 - K)} \xi_r. \quad (3.29)$$

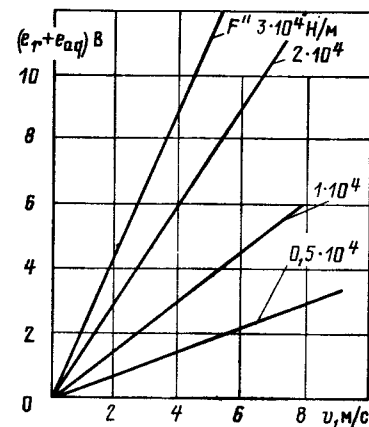
Для принятых данных

$$(e_r + e_{aq})/v = 7,5 \cdot 10^{-5} F''. \quad (3.30)$$

На рис. 3.15 построены под углами $\gamma_{1, 2, 3, 4}$ к оси абсцисс прямые для разных $F'' = (0,5; 1; 2; 3) \cdot 10^4$ Н/м, соответствующие локомотивам с 1/4; 1/2; 1; 1,5 силой тяги относительно обеспечиваемой обычными двигателями ($\gamma = \arctg \frac{e_r + e_{aq}}{v} = \arctg 7,5 \cdot 10^{-5} F''$).

Для достаточно эффективного линейного электропривода, не уступающего по тяге существующему обычному электроприводу, предельной скоростью при пороговом напряжении будет 2 м/с.

рис. 3.15. Зависимость реактивной ЭДС от скорости для разных удельных усилий линейного двигателя



Лишь весьма неэффективный линейный электропривод, создающий вчетверо меньшую тягу, может выйти на предельную скорость 8 м/с. Следует указать, что при значительных напряжениях и относительно невысоких индукциях в зазоре выполнение одновитковых секций потребует значительного увеличения количества коллекторных пластин. Размеры коллектора, его стоимость, затраты энергии на перемещение щеток, мощность вспомогательного двигателя для вращения щеток сильно возрастут, резко увеличится число жил кабеля якоря-коллектора, а единственный положительный эффект — снижение мощности выходных ключей преобразователя — невелик.

Если же принять $w_c > 1$, то допустимая скорость v уменьшится пропорционально увеличению w_c . Таким образом, для значительных скоростей, характерных для транспортных применений, система с преобразователем-коммутатором не имеет рациональной альтернативы.

Полупроводниковый коммутатор при достаточно высоких постоянных времени коммутируемых секций также имеет ограничение по скорости коммутации. На реально испытанном тиристорном коммутаторе были получены устойчивые результаты при $\tau = 0,14$ м для $v < 12$ м/с (соответственно для случая с $\tau = 0,34$ м, рассматриваемого ниже, $v \leq 30$ м/с = 108 км/ч). Для получения скоростей в 3—4 раза больших требуется соответственно увеличивать τ и уменьшать постоянные времени секций T_{sc} . Например, при снижении постоянных времени в 1,5 раза $\tau = 0,68 \div 1$ м, что затруднительно при размещении модулей двигателя под уже существующими локомотивами, но вполне возможно для заново проектируемых экипажей высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ).

Синхронные линейные двигатели в основном разрабатываются для ВСНТ, особенно в варианте совмещения двигателя с электродинамической подвеской. Рассмотрим ниже лишь отдельные конструкции, предложенные и для промышленного линейного электропривода. Основное внимание уделим линейным автосинхронным двигателям. Определенное применение здесь нашли цилиндрические линейные машины.

Многие конструкции цилиндрических линейных машин близки по принципу построения к линейному сельсину, описанному, на-

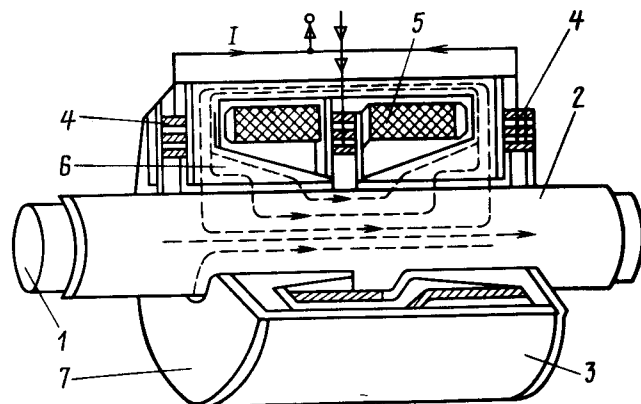


Рис. 3.16. Цилиндрический линейный двигатель постоянного тока

пример, в [70]. Это сходство можно увидеть из сравнения рис. 3.16, где изображены схемы конструкции линейных двигателей [110], и рис. 3.17, где показана схема линейного сельсина с цилиндрическим магнитопроводом из [70]. Но цилиндрические линейные двигатели по рис. 3.16 — это машины постоянного тока со своеобразным линейным коллектором (очищенным от изоляции полоской на поверхности обмотки якоря). Якорь 1 неподвижен, а движущийся экипаж 3 представляет собой устройство с рабочим магнитным полем. Экипаж центрируется относительно якоря специальными колесами. Сердечник якоря 1 сделан из магнитомягкой стали. Обмотка 2 — медная с лаковым покрытием. Для питания током часть обмотки якоря, как уже указывалось, очищена от изоляции. Ток подается через щетки 4, установленные на экипаже. Экипаж обеспечивается низковольтным питанием через контактный рельс. Обмотки возбуждения 5 создают рабочее магнитное поле, проходящее через сердечник якоря, воздушный зазор и полюса 6 экипажа. Ток, текущий по обмотке 2 якоря,

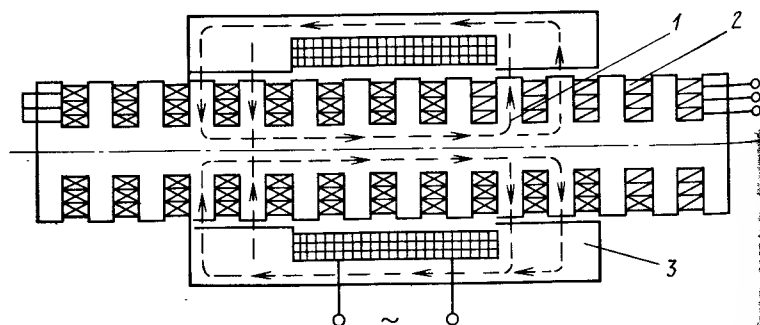


Рис. 3.17. Цилиндрический линейный сельсин

Таблица 3.6. Сравнительные характеристики линейных двигателей

Параметр	Двуполусный ЦЛДПТ	ЛАД (плоский)	Цилиндрический ЛАД НЭТИ
Напряжение, В	6 (постоянный ток)	220 (50 Гц)	220 (50 Гц)
Общая длина подвижной части двигателя, м	0,12	0,14	—
Внешний диаметр, м	0,086	0,084	—
Площадь зазора, м ²	$63 \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$	$220 \cdot 10^{-4}$
Масса, кг	1,8	215	9,8
Линейное перемещение, м	1,5	0,40	0,36
Выходная мощность, Вт, при скорости, м/с:			
1	12	6	—
2	18	10	—
0,35	(ПВ = 40%)	(ПВ = 25 ÷ 50%)	32 (ПВ = 40%)
Удельное усилие при ПВ = 40%, Н/м · 10 ⁻⁴	0,19	0,09	0,45
Усилие (ПВ = 40%), Н, при скорости, м/с:			
0	13,7	19,6	150
0,5	18,76	12,75	100
1	12	4,9	—
1,5	10,8	0	—
Удельная масса, кг/Н	141	196	98

перпендикулярно пересекается силовыми линиями магнитного поля, что создает аксиальную составляющую силы вдоль движения экипажа. При движении экипажа ток течет по обмотке якоря короткое время, что позволяет использовать большие плотности тока. Следует указать, что хотя и улучшаются массогабаритные показатели, но существенно снижается КПД машины.

В табл. 3.6, приводятся сравнительные данные близких по параметрам ЦЛДПТ, плоского ЛАД и ЦЛАД [11] по основным удельным показателям, связывающим усилие с габаритными размерами и массой.

Экспериментальные характеристики ЦЛДПТ приведены на рис. 3.18—3.22. Как видно из рис. 3.18, кривые индукции в зазоре весьма близки к типичным для машин постоянного тока. Близкая к прямолинейной зависимость усилия от тока якоря (рис. 3.19) характерна для беспазовых машин, к которым относится и рассматриваемая конструкция со значительным зазором и малым насыщением края полюса.

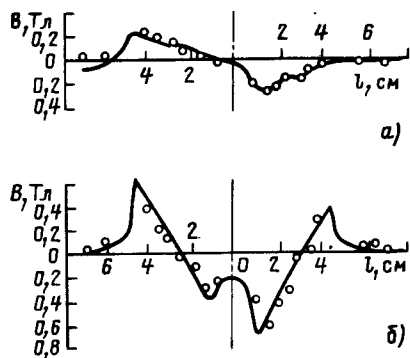


Рис. 3.18. Радиальная индукция у поверхности якоря двухполюсной машины:
а — ток якоря 30 А; б — ток якоря 1800 А

Механические характеристики (рис. 3.20) соответствуют двигателю с независимым возбуждением и невысоким КПД, что объясняется большим отношением падения напряжения на якоре к ЭДС машины.

Разгон машины (рис. 3.21) существенно зависит от нагрузки. При возрастании нагрузки вдвое реальная постоянная времени разгона возрастает примерно в 3 раза (с 0,22 с при 6 Н до 0,62 с при 10 Н), хотя и установившаяся скорость также снижается примерно втрое. Рассмотрение кривых полезной мощности P_2 и КПД (рис. 3.22) позволяет сделать заключение, что при одинаковой с ЦЛАД скорости движения в 0,35 м/с полезная мощность рас-

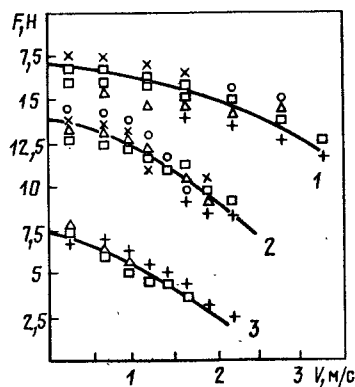


Рис. 3.20. Механические характеристики:
1 — 1440 А/полюс; 2 — 1080 А; 3 — 720 А при разных нагрузках: + — 0; Δ — 5 Н; $\square$ — 7,5 Н; $\times$ — 10 Н

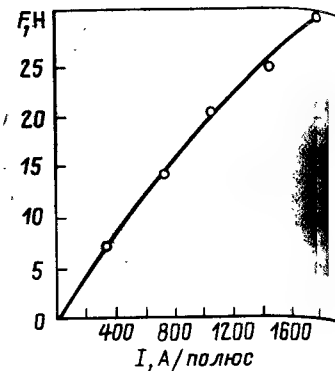


Рис. 3.19. Зависимость усилия от тока якоря у двухполюсной машины при токе возбуждения 490 А

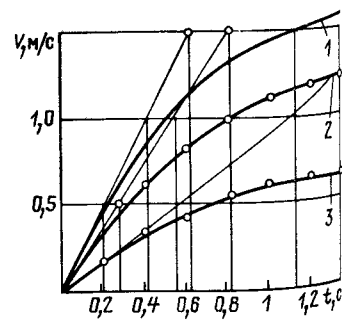


Рис. 3.21. Характеристика разгона двухполюсной машины при нагрузках:
1 — 5 Н; 2 — 7,5 Н; 3 — 10 Н

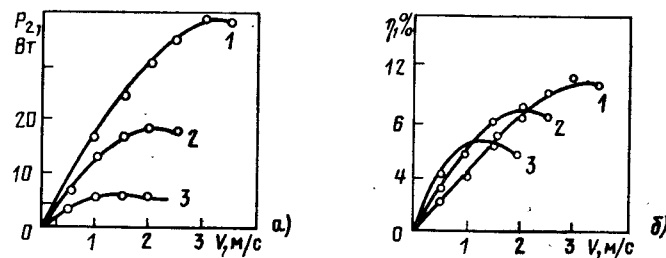


Рис. 3.22. Зависимости полезной мощности (а) и КПД (б) от скорости при:
1 — 1440 А, 350 Вт, ПВ=15%; 2 — 1080 А, 200 Вт, ПВ=40%; 3 — 720 А, 88 Вт, ПВ=70%

считываемого ЦЛДПТ составит при ПВ=40% примерно 4—5 Вт, т. е. существенно ниже рассматриваемых в табл. 3.7 данных для скорости 1—2 м/с. Если при относительно больших скоростях КПД растет (КПД достигает больших значений при больших линейных нагрузках), то на малых скоростях с ростом линейной нагрузки КПД падает. Так, при $v = 0,5$ м/с и увеличении линейной нагрузки вдвое (с 720 А на полюс до 1440 А на полюс) КПД снижается также примерно вдвое (с 4 до 2%), что неплохо подтверждает нашу рекомендацию: хочешь повысить КПД — снижай плотности тока.

Абсолютные значения КПД (единицы процентов у низкоскоростных ЦЛДПТ малой мощности) вполне соответствуют приведенным выше значениям $\eta \cos \phi$ для ЛАД и ЦЛАД соответствующих скоростей и мощностей.

Как показано в [70], конструкция по рис. 3.18 и ее модификации обладают рядом недостатков, особенно при малых полюсных делениях, при малом отношении τ/δ . Действительно, если принять полный период, на котором должны быть размещены три пары катушек и магнитопроводящих колец, равным 3,6 мм, то толщина катушки будет примерно равна 0,6 мм и путь для потока рассеяния (не зависящего от положения плунжера) между двумя соседними магнитопроводящими кольцами будет проходить через зазор около 0,6 мм. В то же время на пути рабочего потока, зависящего от положения плунжера, будет в несколько раз больший зазор, состоящий из двойной толщины разделительной трубки и двойного зазора между плунжером и трубкой.

Для существенного снижения относительного значения потока рассеяния при малых τ/δ разработана новая, так называемая гребенчатая многофазная (например, трехфазная) машина, создающая наибольшую в данных размерах модуляцию индуктивностей трех катушек при малых перемещениях плунжера. Максимумы индуктивностей в этих катушках наступают при положениях плунжера, отличающихся на $1/3$ (при трех катушках) перемещения, принимаемого за полный период 2τ [58].

В трех парах секторов (части кольца примерно по 60° каждая) из ферромагнитного материала внутренняя поверхность выполняется в виде гребенки с шириной зубьев, несколько меньшей $1/3$ значения, принимаемого за полный период, и расстоянием между центрами зубьев, равным этому периоду. При установке на разделительную трубку гребенки смещаются так, что, например, зубья первой пары гребенок занимают нижнюю, зубья второй пары — среднюю и зубья третьей пары — верхнюю треть периода (соответственно каждые в своем секторе). Катушки наматываются вокруг каждой секторной гребенки аналогично катушкам старторных полюсов электрических машин. На плунжере делаются проточки так, что каждый кольцевой зубец плунжера занимает по высоте несколько меньше чем половина периода. Уменьшение высоты зубца плунжера относительно половины периода, как и высоты зубца гребенок относительно трети периода, связано с явлением расширения потока в кольцевом зазоре. Индуктивность каждой катушки при движении плунжера изменяется, причем полный период изменения соответствует прохождению одного зубца и одного паза плунжера.

Максимумы индуктивностей катушек смещены на треть периода. Поэтому физическая картина изменений потокосцеплений по перемещениям $d\psi/dx$ или изменений вторичных напряжений для системы синхронного слежения совершенно аналогична той, что имеет место в трех соленоидных системах с большим ходом плунжера.

Применение гребенки с магнитоэквипотенциальными зубьями устраняет рассеяние между ними. Рассеяние имеет место лишь между одной гребенкой и другой по пути, длина которого вполне может быть установлена достаточно большой и не зависит от длины перемещения плунжера. Значительное количество зубцов, действующих параллельно, позволяет получить большое сечение для рабочего потока.

Наружное ферромагнитное кольцо обеспечивает практически замкнутую магнитную цепь, в которой основным магнитным сопротивлением будет рабочий зазор. При этом, хотя сечение зазора для каждой гребенки модулируется плунжером при его движении по периодической кривой, суммарное сечение зазора для всего потока мало меняется. Поток лишь перераспределяется по гребенкам, что создает оптимальную в данном объеме и при заданной толщине разделительной трубки магнитную систему.

Рассмотрим решение этой задачи в конструктивном варианте с модуляцией взаимной индуктивности без обмотки на плунжере путем подведения потока к кольцевым полюсам плунжера извне через часть боковой поверхности разделительной трубки (рис. 3.23). В этой конструкции часть окружности плунжера занята полюсами 1 и 2 обмотки возбуждения 3. Для гребенок с обмотками синхронизации (вторичные обмотки) остается лишь дуга примерно в 270° .

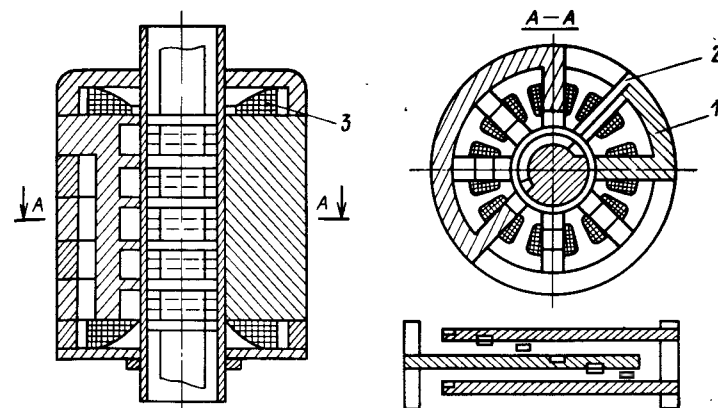


Рис. 3.23. Гребенчатая конструкция без обмотки на плунжере

Угол между каждой парой магнитно и электрически соединенных катушек синхронизации составляет 135° , что никак не сказывается на работе системы, кроме некоторого уменьшения объема катушек при том же объеме устройства.

Увеличение количества зазоров на пути потока возбуждения в известной мере компенсируется увеличением объема меди в этой катушке. Полюсы возбуждения не имеют зубьев и служат для наилучшего перехода потока возбуждения к полюсам плунжера.

В тех случаях, когда диаметр плунжера невелик, размещение вокруг него шести гребенок для вторичных катушек и двух негребенчатых полюсов возбуждения оказывается нежелательным. Для таких случаев разработан вариант бесконтактной линейной гребенчатой машины с аксиальным вводом потока. Поток, создаваемый обмоткой возбуждения, проходит практически через всю боковую поверхность плунжера (на участке, расположенном вне гребенок с обмотками синхронизации), входит аксиально в плунжер, через все кольцевые выступы распределяется по трем (для трехфазной вторичной обмотки) гребенкам обмоток синхронизации и замыкается через три внешних магнитопровода.

Вторичные напряжения модулируются не по обычным для сельсинов законам вида $a = a_{\max} \sin \alpha$, а по формулам однополюсных систем («гомополярных») вида $a = a_0 + a_{\max} \sin \alpha$, как в синхронной машине [112] или в бесконтактном сельсине [70]. Это обстоятельство отрицательно сказывается лишь на излишней нагрузке потоками и токами, пропорциональными a_0 , но не влияет на работу машины.

Указанный недостаток представляется менее значительным, чем получаемые преимущества: два зазора на пути потока возбуждения вместо четырех, большее сечение зазора для рабочего пото-

ка, большее место (в том же данном объеме) для обмотки возбуждения и т. п.

Отрицательно влияет на работу рассмотренной конструкции короткозамкнутый виток, который будет создавать на пути потока возбуждения разделительная трубка. Эта конструкция рекомендуется для тех случаев, когда разделительную трубку можно выполнить из материалов с достаточно большим удельным сопротивлением.

Рассмотренные выше бесконтактные гребенчатые машины позволяют получить многофазную, и в частности трехфазную, систему токов (или вращение фазы однофазного тока) в функции перемещения явнополюсного плунжера.

Как показывают сравнительные расчеты, эти своеобразные электрические машины, используемые в качестве датчиков синхронной связи, в данном объеме и при заданных зазорах между гребенками статора и подвижным плунжером (если учитывать толщину разделительной трубки) создают наибольшую модуляцию потока в фазах статора.

Все это позволяет считать целесообразным разработку электрического синхронного привода для решения задачи силового линейного перемещения, поступательного, возвратно-поступательного, синхронно-следящего, выполняющего перемещение с точной остановкой в заданной точке и т. п. (в том числе в герметически закрытых объемах, в средах с высоким давлением, большой агрессивностью и др.) Подобные задачи в большом количестве возникают при управлении современными технологическими процессами.

На рис. 3.24, а показан электродвигатель типа реактивного синхронного электродвигателя с явнополюсным плунжером без обмотки. При массе 5 кг плунжер создает усилие 150—180 Н и работает со скоростью $(6—8) \cdot 10^2$ м/с, т. е. отдает механическую мощность 12 Вт при потребляемой мощности около 100 Вт. Таким образом, двигатель работает с КПД около 0,12, вполне приемлемым для малого электродвигателя со столь большими зазорами в магнитной цепи.

Дальнейшее развитие гребенчатых систем позволяет еще лучше использовать магнитную цепь этой машины при сохранении такой же разделительной системы между внутренним объемом и наружным пространством. Для этой цели разделительные стенки привариваются к полюсам гребенки (рис. 3.24, б) и лишь немного уменьшают сечение окна катушек гребенок. Зазор же между зубьями гребенок и зубьями плунжера может быть установлен технологически минимальным (например, 0,25 мм на сторону). Таким образом, можно на этой основе создать линейную электрическую машину как для датчика, передающего перемещение из объема с давлением в несколько тысяч килопаскалей, так и для приемного электродвигателя, обеспе-

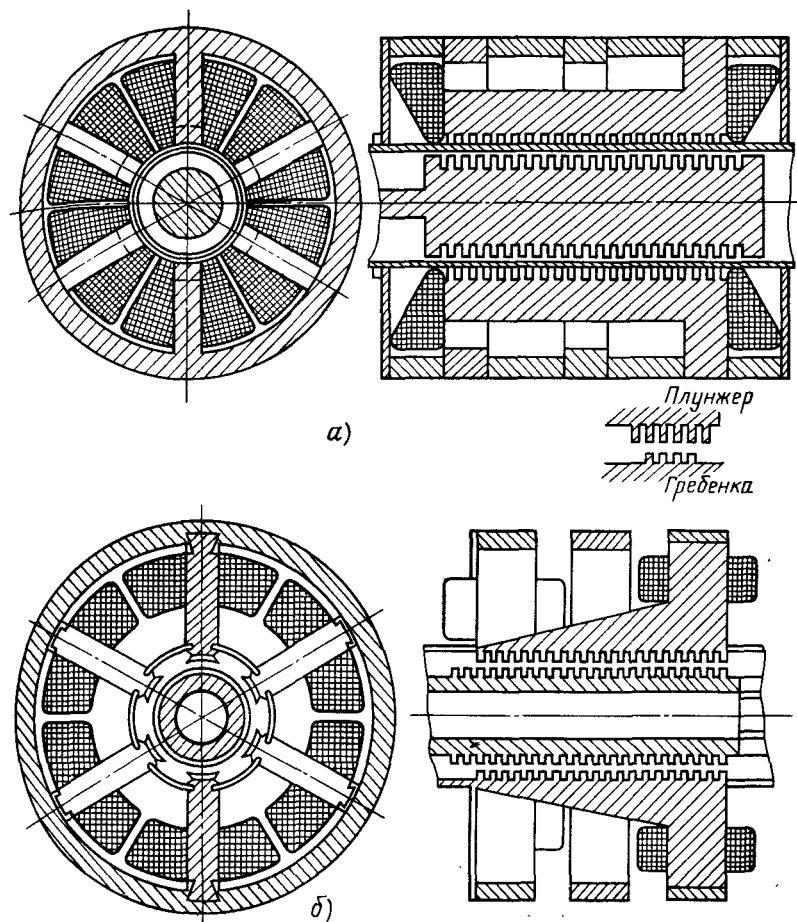


Рис. 3.24. Линейный цилиндрический гребенчатый электродвигатель

чивающего перемещение рабочих органов внутри изолированного объема. У такой линейной электрической машины зазоры в магнитной цепи не превышают зазоры в традиционных электрических машинах. Дальнейшее развитие принципиальной конструкции с «разделенными фазами», приведшее к созданию ряда новых машин вращательного и поступательного движения, здесь не рассматривается.

Одной из наиболее сложных задач теоретического анализа работы гребенчатых конструкций двигателей является определение магнитной проводимости зазора между зубчатым ротором и статором при их различных взаимных положениях. Зависи-

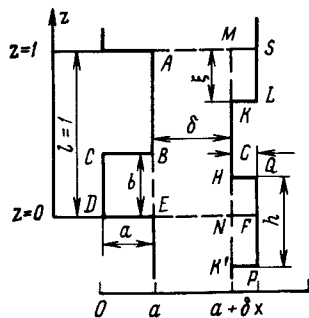


Рис. 3.25. Взаимное расположение двух гребенчатых поверхностей

мость магнитной проводимости от перемещения ротора относительно статора определяет усилие в двигателях.

Рассмотрим воздушный зазор между двумя поверхностями ферромагнитного материала: $ABCDE$ — поверхность гребенки и $LKNQP$ — поверхность плунжера (рис. 3.25). Принимаем магнитный потенциал φ на поверхности $ABCDE$ равным нулю, а на поверхности $LKNQP$ равным $\varphi_0 = 0,8 F_\delta$. Введем безразмерную функцию $U = \varphi/\varphi_0$. Тогда $U_{ABCDE} = 0$; $U_{LKNQP} = 1$.

Обозначая период гребенки через l , имеем для любого z в пределах длины гребенки (при пренебрежении краевым эффектом, считая гребенку достаточно длинной в отношении периода l):

$$U(x, y, z + l) = U(x, y, z), \quad (3.31)$$

а также

$$dU/dz(x, y, z) = dU/dz(x, y, z + l). \quad (3.32)$$

Считая зуб гребенки достаточно широким (в отношении зазора между плунжером и гребенкой), рассматриваем плоскую задачу изменения проводимости на единицу ширины зуба в соответствии со схемой на рис. 3.26. Для этого случая уравнение Лапласа имеет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (3.33)$$

Энергия магнитного поля

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V H^2 dV. \quad (3.34)$$

Удельная энергия магнитного поля на единицу ширины зуба

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \mu_0 \varphi_0^2 \int \int \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz. \quad (3.35)$$

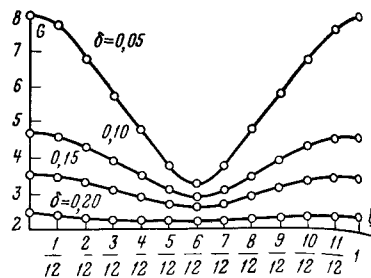


Рис. 3.26. Изменение проводимости в зависимости от взаимного смещения гребенок

удельная магнитная проводимость, приведенная к μ_0 ,

$$G = \frac{2\varepsilon}{\mu_0 \varphi_0^2} = \int \int \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz. \quad (3.36)$$

Истинная функция поля U есть именно та функция, которая дает минимум функционала G . Поэтому будем решать нашу задачу вариационными методами. Для наилучшего выбора пробных функций используем тот факт, что для прямоугольных областей (в нашем случае, например, $BCDE$) можно решать задачу выбора функции (задача Дирихле) методом разделения переменных. Решение этой задачи приведено в [71] и дает следующее уравнение:

$$G = \frac{1}{\delta} - \frac{16h^2}{9\pi^2\delta^2} \times \left(2T_{33} + \frac{2}{9} T_{11} - \frac{4}{3} T_{13} + F_{33} + \frac{1}{9} F_{11} - \frac{2}{3} F_{13} + \frac{28\pi}{9} - \frac{16h^2}{9\pi^2\delta} \right) \times \left(3\pi + \alpha T_{33} + F_{33} + \frac{16h^2}{9\pi^2\delta} \right) \left(\pi + 2T_{11} + F_{11} + \frac{16h^2}{\pi^2\delta} \right) - \left(2T_{13} + F_{13} + \frac{8h^2}{\pi^2\delta} \right)^2, \quad (3.37)$$

где значения $T_{m_1 m_2}$ и $F_{m_1 m_2}$ вычисляются для различных h и δ , причем достаточно ограничиться значениями $h = 1/2; 2/3; 1^*$ и $\delta = 0,05; 0,1; 0,15; 0,25$.

По данным расчета построены кривые на рис. 3.26. Зная функцию $G(\xi)$, нетрудно получить и все остальные параметры линейных машин — усилие (мощность), а после анализа потерь — КПД и другие параметры. Расчет можно провести на ЭВМ по программе, составленной по приведенным выше формулам.

Если показанный на рис. 3.16 линейный двигатель, описанный в [110] в 1971 г., является определенным повторением конструкции линейного сельсина, описанного в [73] в 1959 г., то для многих линейных синхронных (в том числе и автосинхронных) машин прототипом можно считать бесконтактный сельсин ВЭИ, изобретенный в 1938 г. [31] и запатентованный в основных промышленно развитых странах мира в 1940 г.

Сравним бесконтактный сельсин с односторонним вводом потока [61] с линейной синхронной машиной [113]. У бесконтактного сельсина (рис. 3.27) магнитный поток, созданный катушкой возбуждения 7, расположенной на первичной части и неподвижной относительно якорной обмотки 4 («обмотки синхронизации» в сельсинной модификации), поступают через дополнительные зазоры 2 в чередующиеся полюсы 5 и 5', отделенные немагнитной прослойкой 6 друг от друга.

* Размер $h=1$ не означает отсутствие зубца, а лишь столь малую ширину его, что ею можно пренебречь по сравнению с шириной паза.

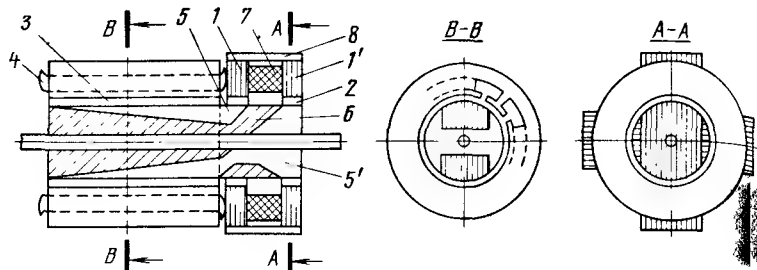


Рис. 3.27. Бесконтактный сельсин с односторонним вводом потока

При питании обмотки возбуждения 7 постоянным током «первые» полюсы 5, в которые поток поступает через дополнительный зазор 2 из тороида 1 (здесь и ниже тороидом называется кольцевой пакет магнитной системы), будут, например, южными полюсами S , «вторые» полюсы 5', из которых поток через дополнительный зазор 2 идет в тороид 1' (замыкаясь через внешний магнитопровод 8) северными полюсами N . При перемещении относительно друг друга полюсов ротора и якорной обмотки статора против каждой заданной образующей линии внутреннего цилиндра статора будут попеременно находиться то полюс S , то полюс N , обеспечивая работу синхронной машины с возбужденными, но безобмоточными полюсами. Якорную обмотку пересекает поток возбуждения, переходящий из полюса в полюс через рабочий зазор 3, зубцы, спинку статора и снова рабочий зазор 3, совершенно аналогично машине с обмоткой возбуждения на полюсах ротора.

Линейная синхронная машина, показанная на рис. 3.28, по существу есть развернутая в линию описанная выше машина. Здесь магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения 1 из левой (верхней) полосы «развернутого тороида» 6 через дополнительный зазор 2 идет в полюсы 3, отделенные немагнитной прослойкой 5 от полюса 3' (т. е. это «развернутый» ротор бесконтактного сельсина). Из полюса 3 (S) через рабочий зазор 4 магнитный поток возбуждения, взаимодействуя с якорной обмоткой 4, проходит в зубцы, затем в спинку статора, снова через зубцы и рабочий зазор 8 в полюсы 3' (N), оттуда через дополнительный зазор 2 в правую (нижнюю) полосу — второй «развернутый тороид» 7.

Конечно, «развернутая» линейная машина имеет свойства, отличающие ее от кругового прототипа. Главным образом это связано с разомкнутостью магнитной цепи, входом во взаимодействие с первичной частью ранее не возбужденных полюсов и выходом из режима взаимодействия ранее возбужденных полюсов (ниже это будет подробно рассмотрено). Но основной принцип действия линейной машины по рис. 3.28 и бесконтактного сельсина по рис. 3.27 один и тот же.

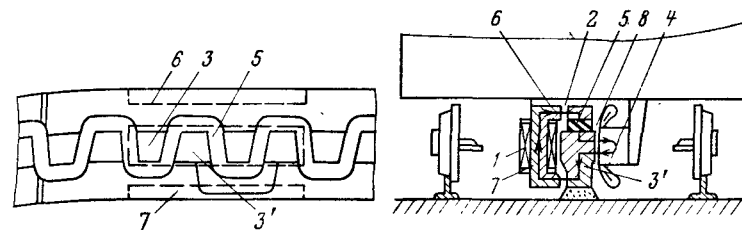


рис. 3.28. Линейная синхронная машина — развернутый бесконтактный сельсин

Аналогичное совпадение основного принципа действия можно проследить у так называемой гомополярной машины [113] при сравнении с однополюсным бесконтактным сельсином [73].

При создании бесконтактного сельсина был использован метод синтеза, рассмотренный в [79], [73]. Было показано, что для создания сельсина с синхронизирующим моментом, пропорциональным $\sin \theta$ (где θ — угол рассогласования между осями датчика и приемника), можно использовать устройства, у которых изменяющийся в функции угла параметр (например, напряжение на фазе вторичной обмотки) может изменяться не только в виде $U_2 = U_0 \sin \alpha$, но и в виде $U_2 = U_0 + U_1 \sin \alpha$, вообще, модулируемый параметр $a = a_0 + a_1 \sin \alpha$.

Это обстоятельство позволяет применить в качестве бесконтактного сельсина машину, принципиальная схема которой показана на рис. 3.29. Поток, создаваемый обмоткой возбуждения 5, через тороид 6 и зазор переходит в пакет ротора 2, занимающий почти все сечение ротора, затем через пакет полуколец 3 и через второй (рабочий) зазор поступает в статор 4, проходит через зубцы, между которыми заложена вторичная обмотка, в спинку статора. Из последней поток непосредственно переходит в пакеты внешнего магнитопровода 1, замыкая путь вокруг катушки

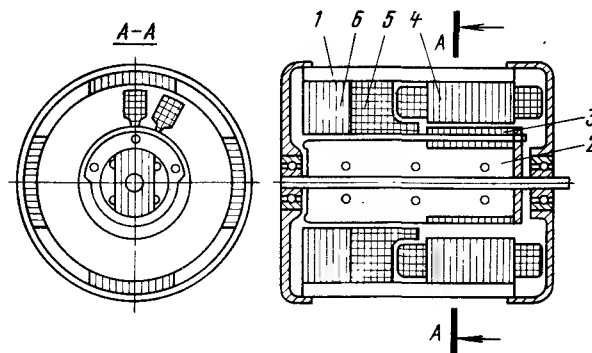


Рис. 3.29. Однополюсный бесконтактный сельсин

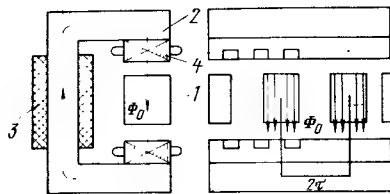


Рис. 3.30. Гомополярная линейная синхронная машина

возбуждения 5 и лобовых частей катушек статора. Каждая из вторичных катушек занимает зону в 120° , а наивыгоднейшая дуга полуколец ротора составляет $0,55 \cdot 2\pi \approx 200^\circ$. Поток, входящий во внутреннюю поверхность сердечника статора, больше чем вдвое превышает поток, который можно было бы ввести во внутреннюю поверхность сердечника при обычной двухполюсной конструкции, так как кроме сечения, которое занималось обоими полюсами, используется еще и сечение немагнитной прослойки между ними. У такой конструкции $a_0 = a_1$, и переменная составляющая потока примерно равна половине полного потока, а синхронизирующий момент пропорционален $0,5 m a_1 \sin \theta$ (где m — число модулирующих фаз). При $m = 3$ момент пропорционален $1,5 a_1 \sin \theta$. Статор и тороиды технологически выполняются аналогично соответствующим элементам обычного бесконтактного сельсина.

Сравним с этой машиной (при питании ее обмотки возбуждения постоянным током и обмотки синхронизации трехфазным переменным током) линейный синхронный двигатель с униполярным возбуждением (или гомополярный), показанный на рис. 3.30. Полюсы 1 путевого структуры (ротора) могут также занимать 200° и более. Поток в эти полюсы (между их осями 360° или 2π) поступает из ярма 2 магнитной системы обмотки возбуждения 3 через листы пакета статора 4 и рабочий зазор — совершенно аналогично тому, как это происходит в правой части однополюсного бесконтактного сельсина, рассмотренного выше. Если бы у этого сельсина в левой части тороида была предусмотрена обмотка (как это сделано, например, у разбираемых ниже сельсинов), аналогия была бы полной.

Конкретной конструкции рассмотренного выше однополюсного бесконтактного сельсина (см. рис. 3.29) точнее соответствует односторонний вариант конструкции гомополярного синхронного

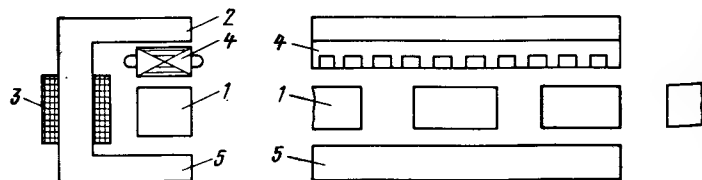


Рис. 3.31. Односторонний вариант гомополярной линейной синхронной машины

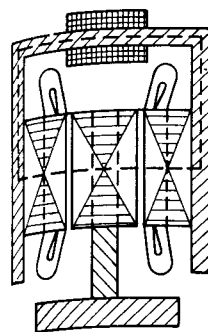


Рис. 3.32. Линейный синхронный двигатель с магнитной редукцией

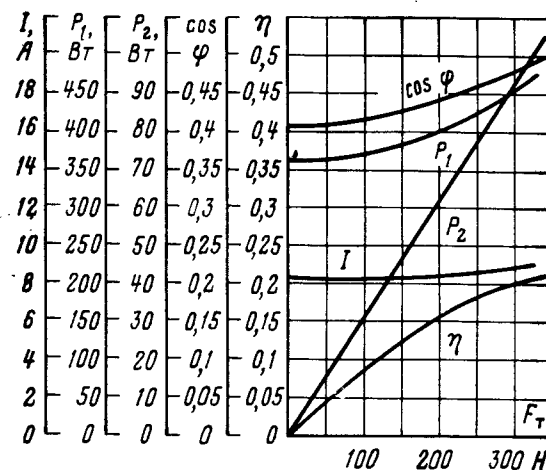


Рис. 3.33. Рабочие характеристики линейного синхронного двигателя с магнитной редукцией

линейного двигателя, конструктивная схема которого представлена на рис. 3.31. Магнитный поток, создаваемый обмоткой 3, из ярма 2 справа проходит через листы статора 4 и рабочий зазор в полюсы 1 путевого структуры, аналогичные полюсам двусторонней конструкции на рис. 3.31, и, пройдя поперек пути в непрерывную полосу 5, замыкается в ярме 2 аналогично замыканию потока через аксиальный пакет ротора и тороид у рассмотренного выше однополюсного сельсина.

На рис. 3.32 показан поперечный разрез макетного образца тихоходного линейного синхронного двигателя с магнитной редукцией [11]. Подвижная часть двигателя состоит из стального П-образного магнитопровода с обмоткой возбуждения, создающей униполярный магнитный поток, и двух пакетов из электротехнической стали, в открытые пазы которых уложена трехфазная обмотка, создающая вдоль воздушного зазора бегущее магнитное поле. Вторичный элемент представляет собой неподвижно закрепленный пакет из электротехнической стали, выполненный с открытыми пазами. Фиксирование зазора между неподвижной и подвижной частями осуществляется направляющими роликами, установленными на первичном элементе. Взаимодействие униполярного магнитного потока, который замыкается через воздушные зазоры, пакеты якоря, магнитопровод и вторичный элемент, с токами якоря при определенных геометрических соотношениях обеспечивает линейное движение с требуемой скоростью.

Макетный образец имел следующие данные: напряжение якоря $U = 36$ В; ток якоря $I_a = 8,5$ А; ток возбуждения $I_b = 1$ А; частота $f = 50$ Гц; скорость подвижной части $v = 0,3$ м/с; мак-

симальное усилие тяги $F_{т\max} = 330$ Н; удельное тяговое усилие $F_t/S_u = 1,2$ Н/см²; полюсное деление якорной обмотки $\tau_1 = 0,039$ мм; ход подвижной части $S_n = 0,6$ м; масса подвижной части $G_n = 18$ кг.

Двигатель предназначен для длительного режима работы с естественным охлаждением.

На рис. 3.33 приведены рабочие характеристики: $I = f(F_t)$; $P_1 = f(F_t)$; $\cos \psi = f(F_t)$; $\eta = f(F_t)$ для номинальной скорости движения подвижной части двигателя $v = 0,3$ м/с.

Интересный вариант линейного автосинхронного двигателя дает «развертывание в линию» однофазного бесколлекторного электродвигателя, предложенного в 1966 г. [70] и запатентованного в основных промышленно развитых странах мира [89], [90], [91].

Линейная модификация этого двигателя показана на рис. 3.34 (а — поперечный разрез; б — вид сверху полюсной системы).

Двигатель имеет обмотку возбуждения 2, укрепленную на магнитопроводе 2, которым в данном случае, например, является ось колесной пары и колеса 3 движущейся тележки. На тележке также укреплен развернутый статор 4 с обмоткой 5. Вдоль пути перпендикулярно направлению движения между рельсами 6 установлены полюсы развернутого ротора 7, выполненные в виде ферромагнитных брусков. Вдоль пути расположен профилированный швеллер 8. На тележке укреплены магнитопровод датчика положения полюсов индуктора с управляющей катушкой 9 пе-

ременного тока (малой управляющей мощности) и полупроводниковый коммутатор 10.

Двигатель работает следующим образом. Рабочий поток, возникающий при подключении обмотки возбуждения 1 к источнику питания, взаимодействует с токами, протекающими в проводах обмотки 5. При этом создается тяговое усилие, значение и знак которого определяются как током катушки возбуждения 1, так и током, зависящим от напряжения на управляющей катушке 9 и характеристики коммутатора 10. Тяговое усилие зависит также от положения системы, питаемой переменным током, относительно системы, питаемой постоянным током (эффект «сдвига щеток»). При этом возникает возможность регулирования или остановки тележки как путем сдвига системы проводов переменного тока по отношению к системе проводов постоянного тока на тележке, так и смещением «швеллера» по отношению к системе полюсов постоянного тока на пути.

Применение неподвижного швеллера 8 с выступами позволяет также, используя какую-нибудь вспомогательную измерительную катушку на тележке, получить при помощи счетчика импульсов точную информацию о пройденном пути, а при помощи частотомера — информацию о текущей скорости движения тележки.

Разумеется, и для этой модификации вполне возможно применить систему с многократным потокоцеплением, упомянутую выше. При этом машина и путевая структура приобретает вид, показанный на рис. 3.35. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения 1, из ярма 2 через дополнительный зазор 3 попадает в приемную полосу 4 и поступает в полосу 5, затем через рабочий зазор 6 — в зубцы и спинку, пересекая якорную обмотку 7, аналогично рассмотренной выше магнитной системе линейной машины [103], представляющей собой развернутый бесконтактный сельсин с однократным потокоцеплением.

Одной из перспективных конструкций линейного двигателя, не имеющей явных аналогов среди вращающихся машин, является двигатель с двухфункциональной обмоткой на статоре и безобмоточными полюсами, выполненными из ферромагнитного материала. Такой двигатель частично напоминает по конструкции синхронные реактивные машины, однако наличие двухфункциональной обмотки и обеспечение коммутации секций обмоток в зависимости от их положения относительно ферромагнитных полюсов позволяют получить машину с возбужденными полюсами и иметь характеристики, близкие к характеристикам машин постоянного тока.

Применение подобных двигателей наиболее перспективно в линейном электроприводе для промышленного карьерного, конвейерного и дугового транспорта, где требуется реализация больших тяговых усилий при значительных воздушных зазорах.

Двигатели такого типа могут работать от существующих си-

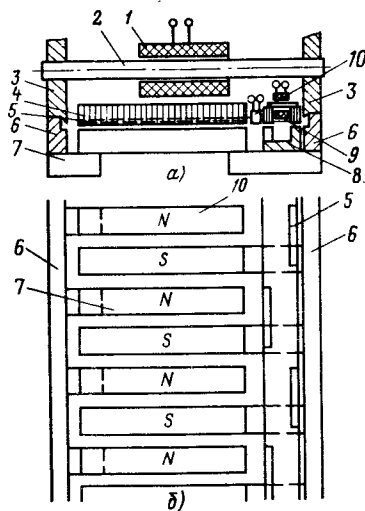


Рис. 3.34. Линейная модификация двигателя

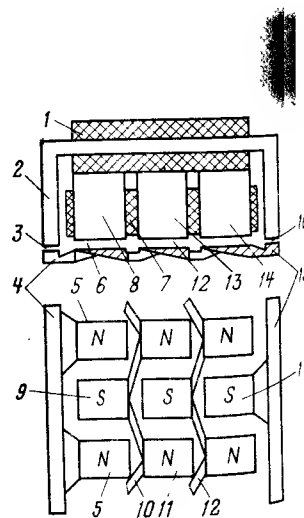


Рис. 3.35. Линейный двигатель с многократным потокоцеплением

стем энергоснабжения как на постоянном, так и на переменном токе, однофазном или трехфазном. Различие при этом лишь в схеме построения преобразователя, предназначенного для питания и управления линейным двигателем при той или иной системе энергоснабжения. На постоянном токе преобразователь, обычно выполняемый на тиристорах, должен всегда иметь принудительную коммутацию независимо от способа управления. Это усложняет преобразователь, так как в этом случае необходимы дополнительные коммутирующие тиристоры и элементы для гашения основных тиристоров.

Более простой схемой преобразователя является схема на так называемых управляемых реверсивных выпрямителях. Система энергоснабжения переменного тока позволяет осуществить естественную коммутацию тиристоров и существенно упростить схему преобразователя.

Рассмотрим принципиальную конструкцию и особенности построения двигателей с двухфункциональной обмоткой. Наиболее перспективным и простым представляется линейный двигатель с двухфункциональной обмоткой на однопакетном статоре и с ротором в виде поперечных ферромагнитных брусков, имеющих перемишки для замыкания магнитного потока. Исключительно простое выполнение обмотки первичной части и в виде рифленой стенки вторичной части позволяет создать надежную машину. Так, если стенки думпкара карьерного транспорта выполнить рифлеными, а вдоль пути движения в вертикальных стенках траншеи уложить обмотки статора, то получим обращенный вариант машины, где стенки думпкара использованы и как элемент конструкции коробки для перевозки груза, и как вторичный элемент линейного двигателя. В этой системе возможно выполнить и вариант двигателя, позволяющего при необходимости создать составляющую силы тяги, перпендикулярную к направлению движения, например, для уменьшения давления колес думпкаров на рельсы. Конструктивно возможны прямой и обращенный варианты двигателя.

В первом (прямом) варианте (рис. 3.36) подвижная часть содержит однопакетную первичную часть 2 с развернутой двухслойной обмоткой 3, а вторичная часть 1, выполненная в виде поперечных ферромагнитных брусков, соединенных между собой

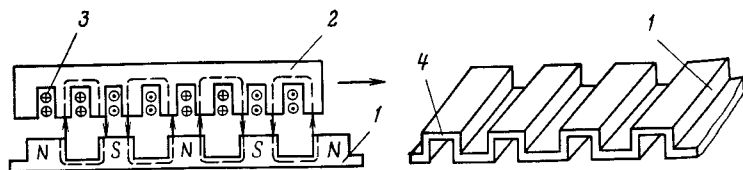


Рис. 3.36. Линейный двигатель с двухфункциональной обмоткой

продольными перемишками 4, расположена неподвижно вдоль направления движения.

Во втором (обращенном) варианте неподвижной частью является первичная часть с обмоткой, а вторичная часть выполнена подвижной, например, это может быть, как уже указывалось, несущая часть конструкции экипажа.

Отметим также своеобразное выполнение обмотки 3. Она может быть выполнена как с неполным, так и с полным использованием меди. В первом решении упрощается схема коммутатора, а во втором лучше использованы активные материалы собственно двигателя [71].

Как показано на рис. 3.37, обмотка 3 разделена на секции 4—11, сдвинутые на половину полюсного деления. Все начала секций обмотки 3 подключены к тиристорному коммутатору, а все концы секций присоединены к общей шине. В общем случае источники тока возбуждения и тока якоря по напряжению разные, но их минусы объединены в общую шину. Секции обмотки поочередно подключаются к цепи возбуждения и цепи питания якоря синхронизированно с положением обмотки относительно магнитопровода 1. Синхронизация переключения секций осуществляется датчиками положения и схемой управления.

Схема управления двигателем осуществляет переключение секций таким образом, чтобы полярность полюсов магнитопровода всегда оставалась одной и той же. Пусть, например, в первый момент в «нижней» части 4-й секции (рис. 3.36) перпендикулярно плоскости чертежа ток якоря проходит от нас. Затем ток, проходя по лобовым частям, приходит к нам в верхней части 6-й секции и замыкается на общую шину обмоток. Ток возбуждения отходит от нас в нижней части 5-й секции, проходит

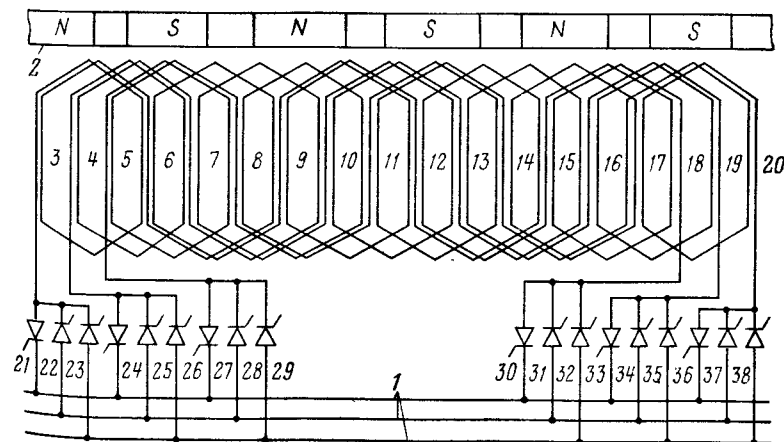


Рис. 3.37. Двухфункциональная обмотка с упрощенной коммутацией

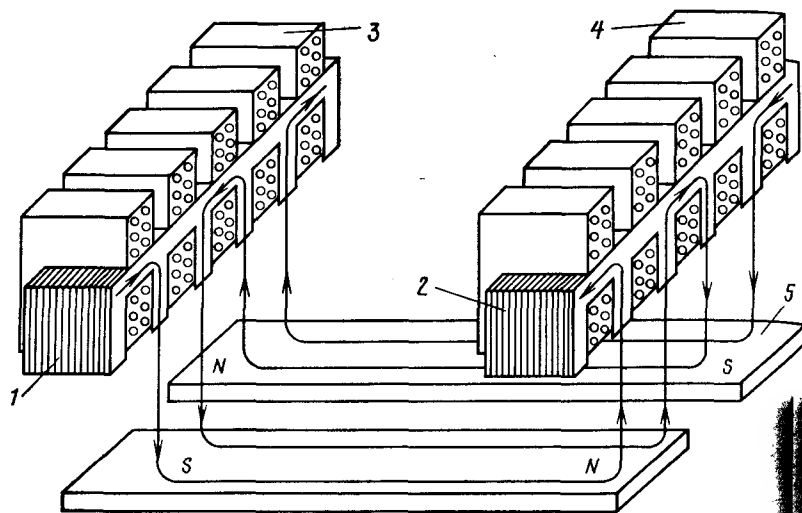


Рис. 3.38. Двухпакетный линейный двигатель постоянного тока

по лобовым частям и возвращается к нам и на общую шину по верхней части 7-й секции. Секции укладываются с пространственным сдвигом τ . При подаче в обмотку тока возбуждения возникает магнитный поток, который будет замыкаться по пути (рис. 3.37): спинка статора 2, зубцы статора, рабочий воздушный зазор, магнитопровод 1, рабочий воздушный зазор, спинка якоря.

Таким образом, одновременно работает только половина секций обмотки, причем обмотка двигателя является двухфункциональной, т. е. секции попеременно служат элементами и обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Движение в обратном направлении или торможение осуществляется с помощью схемы управления, например, путем сдвига на τ в кольцевой схеме датчиков сигналов, подаваемых на коммутатор. При полном использовании обмотки общий принцип работы двигателя не изменяется.

Различие в том, что как начала, так и концы каждой секции подключены к преобразователю, управляемому датчиками положения. К началу и концу каждой секции подключено по три тиристора (при наличии общей шины) или по четыре тиристора (при отсутствии общей шины), а в последнем случае — по два встречно-параллельно включенных тиристора, попарно подключенных к противоположным полюсам источников питания якоря и возбуждения.

Рассмотрим линейный двигатель с двухфункциональной обмоткой, у которого в первичной части имеются два пакета, а вторичная часть выполнена из отдельных разомкнутых в магнитном отношении ферромагнитных брусков (рис. 3.38) [74].

Подвижная часть двигателя включает пакеты первичной части 1 и 2, набранные из шихтованного железа. В их пазах уложены секции кольцевой обмотки 3 и 4. Неподвижная вторичная часть состоит из отдельных не соединенных между собой ферромагнитных полос 5, уложенных на пути между рельсами перпендикулярно направлению движения.

3.4. РАСЧЕТ МАКЕТА ЛД С РАЗРЕЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ

В линейном автосинхронном двигателе сила тяги зависит от соотношения магнитных проводимостей для потоков по продольной и поперечной осям. По продольной оси магнитное сопротивление составляет в основном сопротивление рабочего воздушного зазора. По поперечной оси магнитное сопротивление определяется геометрическими параметрами зоны межполюсного пространства. Соотношение магнитных проводимостей воздушного зазора входит в выражение для определения силы тяги через коэффициент проводимости воздушного зазора, равный отношению магнитной проводимости по поперечной оси к магнитной проводимости по продольной оси. Сила тяги определяется в этом случае так:

$$F_t = a_l b_1 A B_\delta (1 - K). \quad (3.38)$$

Коэффициент K при зазорах примерно 20—40 мм имеет пределы 0,4—0,65, т. е. имеет место значительное снижение силы тяги из-за наличия противотяги, созданной при взаимодействии потока обмотки якоря с током возбуждения. Снижение коэффициента K и соответствующее повышение энергетических показателей двигателя достигаются выполнением полюсной системы вторичной части с дополнительным магнитным сопротивлением по поперечной оси путем введения дополнительного зазора (разреза) полюса (рис. 3.39). В этом случае магнитное сопротивление по продольной оси практически не меняется, в то время как магнитное сопротивление по поперечной оси может быть значительно увеличено.

Среднее значение индукции в воздушном зазоре в области впадины при разрезном полюсе уменьшается в $R_{\text{вп}} / (R_{\text{вп}} + R_{\text{м}})$ раз по сравнению с индукцией при сплошных полюсах.

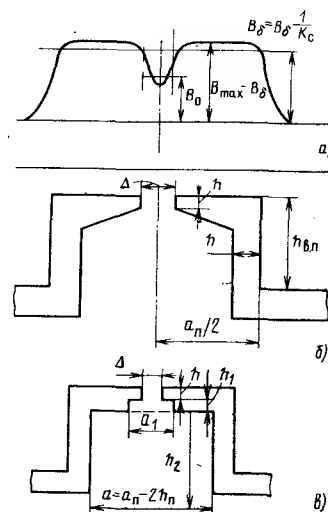


Рис. 3.39. Разрезные полюсы вторичной части линейного двигателя постоянного тока: а — кривая индукции возбуждения; б — реальное выполнение полюса; в — расчетная модель полюса

Магнитное сопротивление по поперечной оси при отсутствии разрезов полюса

$$R_{\text{вп}} = \frac{\delta K_{\delta}}{\mu_0 a_{\text{вп}} b_1 K} \quad (3.39)$$

Магнитное сопротивление по поперечной оси R_m при дополнительном зазоре полюса Δ определяется как величиной Δ , так и конфигурацией и размерами граничных областей разреза полюса. При конфигурации зазора разрезного полюса, показанной на рис. 3.38, в, магнитное сопротивление R_m определяется как эквивалентное значение трех параллельных сопротивлений:

$$R_{1m} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta}{hb_1}; \quad R_{2m} = \frac{1}{\mu_0} \frac{a_1}{b_1 h_1}; \quad R_{3m} = \frac{1}{\mu_0} \frac{a}{b_1 h_2}.$$

В этом случае R_m определяется выражением

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta a_1 a}{hb_1 a_1 a + b_1 h_1 \Delta a + b_1 h_2 \Delta a}, \quad (3.40)$$

где размеры a , a_1 , h , h_1 , h_2 соответствуют обозначениям на рис. 3.39, в. Величина $h = \frac{(1-\beta) B_{\delta} \Delta}{2B_n}$, где β — коэффициент, зави-

сящий от отношения Δ/δ [64]; B_{δ} — индукция в рабочем воздушном зазоре; B_n — индукция в магнитопроводе вторичной части.

Величина $h_1 = h_{\text{пол}} - h$, где $h_{\text{пол}} = B_{\delta} a_n / 2K_c B_n$ — высота полюса; коэффициент K_c учитывает снижение индукции в рабочем зазоре за счет наличия разреза во вторичной части, $K_c = a_n / (a_n - \gamma\delta)$; $\gamma = (\Delta/\delta)^2 / (5 + \Delta/\delta)$; $h_2 \approx h_{\text{вп}}$ — глубина впадины, величину которой из соображения получения меньших K следует брать при $a_1 = 0,5$ примерно $0,25\tau$; $a = a_n - 2h_{\text{пол}}$; $a_1 = (a - \Delta) / 2,3 \lg(a/\Delta)$.

Среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре в области впадины при разрезных полюсах связано с индукцией при сплошных полюсах выражением $B'_{\text{вп}} = f B_{\text{вп}}$, где

$$f = \frac{\delta K_{\delta}}{\delta K_{\delta} + \mu_0 K a_{\text{вп}} b_1 R_m}. \quad (3.41)$$

Сила тяги линейного автосинхронного двигателя при разрезных полюсах определяется как

$$F_{\tau} = 2pa_n b_1 AB_{\delta} \left(\frac{1}{K_c} - \kappa f \right), \quad (3.42)$$

т. е. некоторое снижение силы тяги из-за уменьшения реальной индукции в рабочем зазоре, вызванного наличием разреза полюса, компенсируется, что приводит к повышению F_{τ} за счет увеличения магнитного сопротивления по поперечной оси двигателя.

Разрез полюсов путевой структуры приводит еще к такому положительному эффекту: происходит некоторая разгрузка в магнитном отношении крайних зубцов над полюсами.

Индукция поперечной реакции якоря для разрезных полюсов определяется как

$$B_{pa} = A \frac{a_n - \Delta}{2} \varphi_0 \frac{1}{2\delta K_{\delta}} \left(1 + \frac{2R_{\delta}}{2R_{\delta} + R_m} \right), \quad (3.43)$$

где $R_{\delta} = \delta K_{\delta} / \mu_0 a_n b_1$ — сопротивление воздушного зазора.

Индукция в зазоре в области крайних зубцов $B_{\delta z} \approx B_{\delta} (1 + \sigma_z) + B_{pa}$. В этом случае индукция в крайних зубцах определяется как $B_{z \text{ кр}} = B_{\delta z} t_z / b_z$. Коэффициент устойчивости поля определяется через соотношение $K_y = B_{\delta} / B_{pa}$.

Определим дополнительную нагрузку на ось $G_{\text{доп}} = \frac{12 \cdot 10^4}{8} = 1,5 \cdot 10^4$ Н; при основной нагрузке на ось $G_{\text{осн}} = 23 \cdot 10^4$ Н имеем $G_{\text{сум}} = 24,5 \cdot 10^4$ Н; дополнительное давление в результате притяжения $G_{\text{доп}} = \frac{50}{8} = 6,25 \cdot 10^4$ Н. Итого $G_{\text{рез}} = (24,5 + 6,25) \times$

$\times 10^4 = 30,75 \cdot 10^4$ Н. «Догрузка» штатных двигателей (если номинальной нагрузкой является тяга, соответствующая $23 \cdot 10^4$ Н при $\psi_k = 0,22$, т. е. общая тяга локомотива $F_{\tau} = 23 \cdot 8 \cdot 0,22 \cdot 10^4 = 40,5 \cdot 10^4$ Н) будет увеличена в 1,35 раз. Увеличение общей силы тяги составляет $\frac{F_{\tau \text{ д.д}}}{F_{\tau 0}} = \frac{(40,5 + 28) \cdot 10^4}{40,5 \cdot 10^4} \approx 1,7$. Например, если

на данном подъеме штатные локомотивы обеспечивали прохождение поезда с массой в 5,9 тыс. т, то с данным усилием тяги пройдет поезд массой в 10 тыс. т.

Для тягового безредукторного электропривода, работающего только на подъемах (и возможно на пристанционных участках разгона и торможения), имеет место относительно кратковременное включение $t_{\text{вкл}} < 20$ мин. Это соответствует при скоростях примерно $v = 15$ м/с = 54 км/ч и выше длине подъема $L = 18$ км (даже на перевальных участках БАМа крутые подъемы имеют намного меньшую длину). Такой электропривод может быть рассчитан примерно на двадцатиминутное включение даже при учете возможной остановки на подъеме и пуске с включенными линейными электродвигателями. При этом, как показывают расчеты, результаты которых сведены в табл. 3.7, даже при наиболее простом преобразователе («неревверсируемые токи») можно обеспечить двадцатиминутную работу при допустимом перегреве, достигнув весьма высокой удельной тяги $F' \approx 6 \cdot 10^4$ Н/м². Расчет для $v = 111$ м/с ≈ 400 км/ч проведен исходя из большой вероятности выбора такой скорости для ВСНТ. Существенное значение для реализации высокой удельной тяги имеет снижение потока реакции якоря путем введения разреза полюсов. При установке

Таблица 3.7. Сводная таблица расчетов линейного двигателя с нереверсируемыми токами при $F' = 6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; $\alpha_i = 0,6$; $K = 0,35$; $\delta = 0,02 \text{ м}$; $\tau = 0,75 \text{ м}$; $2p = 8$; $\Sigma l = 6 \text{ м}$

Параметр	$b_1=0,25 \text{ м}; B_n=1,35 \text{ Тл}$			$b_1=0,12 \text{ м}; B_n=1,35 \text{ Тл}$			$b_1=0,25 \text{ м}; B_n=1,8 \text{ Тл}$		
	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$
	1350	2250	9990	648	1080	4795	1350	2250	9990
Сила тяги F_T , Н	90 000			43 200			90 000		
Мощность P_2 , кВт	1350	2250	9990	648	1080	4795	1350	2250	9990
Линейная нагрузка A , А/м	$15,43 \cdot 10^4$			$15,43 \cdot 10^4$			$14,9 \cdot 10^4$		
Индукция в зазоре B_δ , Тл	0,89			0,89			0,89		
МДС при холостом ходе, А	42 639			42 639			54 146		
Плотность тока якоря j_a , А/мм ²	7			7			7		
Плотность тока возбуждения j_b , А/мм ²	6,44			6,44			8,5		
Плотность тока обмотки $j_{кв}$, А/мм ²	6,73			6,73			7,78		
Коэффициент насыщения K_n	1,33			1,33			1,68		
Индукция реакции якоря $B_{ра}$, Тл	1,03			1,03			1,0		
Индукция в крайнем зубце $B_{зкр}$, Тл	2,84			2,84			2,7		
Коэффициент устойчивости поля K_y	0,807			0,807			0,89		
Коэффициент, учитывающий снижение проводимости поперечной оси, f	0,335			0,335			0,25		
Индукция в зубце B_z , Тл	1,45			1,45			1,45		
Индукция в спинке $B_{сп}$, Тл	1,7			1,7			1,7		
Высота паза $h_{пз}$, м	0,234			0,234			0,226		
Высота спинки $h_{сп}$, м	0,236			0,236			0,236		
Высота пакета стали $h_{п.ст}$, м	0,47			0,47			0,462		
Масса меди m_m , кг	2541			2324			2454		
Масса стали $m_{ст}$, кг	4387			2106			4324		
Масса статора m_c , кг	6928			4430			6778		
Масса ротора $I_{р}$, кг	345			166			251		
Потери в обмотке якоря ΔP_a , Вт	203 263			185 134			189 384		
Потери в обмотке возбуждения ΔP_b , Вт	115 048			104 722			185 526		
Потери в меди ΔP_m , Вт	318 311			289 856			374 910		
Частота перемагничивания f , Гц	10	16,7	74	10	16,7	74	10	16,7	74
Потери в стали $\Delta P_{ст}$, Вт	14200	25450	180970	6815	12 215	86 866	14 030	25 150	17 883

Продолжение табл. 3.7

Параметр	$b_1=0,25 \text{ м}; B_n=1,35 \text{ Тл}$			$b_1=0,12 \text{ м}; B_n=1,35 \text{ Тл}$			$b_1=0,25 \text{ м}; B_n=1,8 \text{ Тл}$		
	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$	$v=15 \text{ м/с}$	$v=25 \text{ м/с}$	$v=111 \text{ м/с}$
Потери в крайних полюсах $\Delta P_{кр}$, Вт	1688	4687	92407	1688	4687	92 407	1688	4687	9240
Суммарные потери ΔP , кВт	338,5	356,1	646	300,4	310,4	495,2	394,9	412,3	700,3
КПД η	0,66	0,7	0,75	0,578	0,64	0,73	0,64	0,69	0,75
Постоянная времени нагрева T , мин	47,7	38,16	19,87	33,74	27,0	14,1	47,7	38,16	19,8
Температура перегрева при $t=\infty$, °С	322	271	256	324	268	223	376	313,8	277,5
Температура перегрева при $t=20$ мин, °С	110,3	110,5	162,4	145	140	168,8	128,6	128	176,0

на путь элемента «Полюс» вторичной части машины следует избегать шунтировки разреза ферромагнитными элементами крепления полюсов. На рис. 3.40 показаны значения удельной тяги ЛДПТ с двухфункциональной обмоткой. При плотности тока в обмотке $3,1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, $\delta = 20 \text{ мм}$ и неразрезных полюсах имеем $F' \approx 0,75 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, а при $\delta = 10 \text{ мм}$ $F' \approx 1,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. При разрезных полюсах имеем для плотности тока $3,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ при $\delta = 20 \text{ мм}$ $F' = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, а при $\delta = 10 \text{ мм}$ $F' \approx 2,2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. При плотности тока $5,76 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ (соответствующей номинальной плотности тока штатных тяговых двигателей или примерно тридцатиминутному режиму работы данного линейного двигателя при естественном охлаждении) имеем при $\delta = 20 \text{ мм}$ $F' = 1,97 \times 10^4 \text{ Н/м}^2$. Следует указать, что эти данные получены при широких открытых пазах при $K_\delta = 1,25$ ($\delta' \approx 25 \text{ мм}$). При вполне достижимом для $\delta = 20 \text{ мм}$ $K_\delta = 1,05$ можно иметь на 20% меньший эквивалентный зазор, что, как видно на рис. 3.40, позволит увеличить еще примерно на 20% F' , доведя его до $F' = 2,4 \times 10^4 \text{ Н/м}^2$. При $\delta = 10 \text{ мм}$ можно получить и при длительной работе $F' = 3 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ — величину, близкую к реализуемым у обычных машин с вращающимся ротором.

Применение разрезных полюсов не менее эффективно и для машины с возбужденными безобмоточными полюсами и некоммутируемым возбуждением [63]. У такой машины (рис. 3.41) магнитопровод с якорной обмоткой снабжен выступом, на котором размещена обмотка возбуждения, и выполнен шихтованным в направлении, перпендикулярном движению. К упомянутому выступу магнитопровода прилегает прямоугольный сердечник, шихтованный в направлении движения. При этом ферромагнитные полюса, размещенные на пути, разделены в направлении движения, по крайней мере, одним зазором, а расстояние между

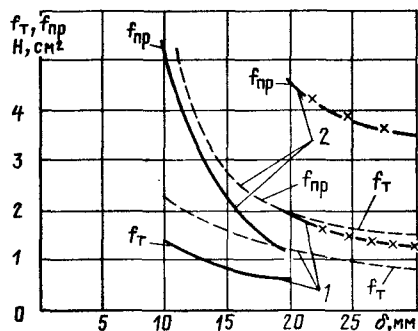
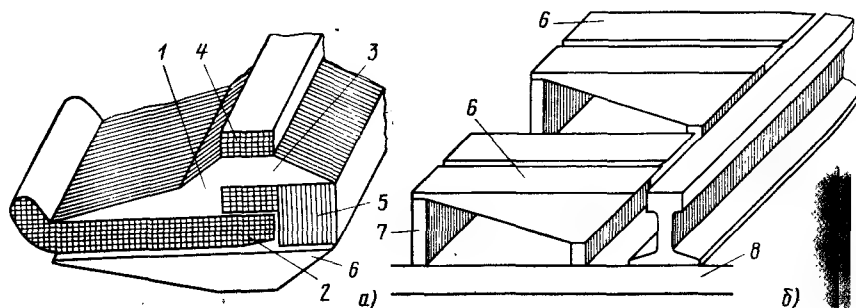


Рис. 3.40. Сводный график результатов испытаний натурного образца линейного двигателя с двухфункциональной обмоткой:

1 — удельная тяга; 2 — удельное притяжение; — — — неразрезные полюса; $J_{эжв} = 3,1$ А/мм²; — — — разрезные полюса, $J_{эжв} = 3,7$ А/мм²; — х — разрезные полюса, $J_{эжв} = 5,76$ А/мм².

Рис. 3.41. Линейная электрическая машина с некоммутируемым возбуждением:

а — принципиальная конструктивная схема; б — полюсная система на концах шпал железнодорожного пути



осями двух соседних полюсов выполнено равным двум полюсным делениям указанной обмотки.

На рис. 3.41, а показана принципиальная схема машины в аксонометрии, на рис. 3.41, б — полюсная система при ее установке вблизи рельса на концах шпал железнодорожного пути.

Линейная электрическая машина [71] содержит подвижную тележку, на которой укреплен магнитопровод 1 с якорной обмоткой 2. Магнитопровод 1 имеет выступ 3, на котором размещена обмотка 4 возбуждения. Магнитопровод 1 с выступом 3 имеют шихтовку в направлении, перпендикулярном движению. К выступу 3 магнитопровода прилегает сердечник 5, шихтованный в направлении движения. На пути перпендикулярно направлению движения тележки размещены ферромагнитные полюсы 6, разделенные в направлении движения одним или несколькими зазорами. Расстояние между осями двух соседних полюсов выполнено равным двум полюсным делениям якорной обмотки. Ферромагнитные полюсы 6 укреплены на неферромагнитных, например деревянных, балках 7, установленных на шпалах 8.

Машина работает следующим образом. При подаче напряжения в обмотку возбуждения 4 возникающий магнитный поток проходит по пути сердечник 5, зазор, полюс 6, зазор (пересекая якорную обмотку 2) и замыкается, проходя по части магнито-

провода 1. При подаче в якорную обмотку тока (режим двигателя) взаимодействие его с потоком, имеющим место практически только над полюсами 6, вызывает знакопостоянное усилие, приводящее в движение тележку. Знакопостоянство усилия обеспечивается благодаря тому, что в обратном направлении ток протекает в проводах, смещенных на полюсное деление τ от проводов, расположенных над полюсами, и, так как полюс занимает расстояние, равное или несколько меньше τ , и межполюсное пространство, где практически нет потока возбуждения, равно или несколько больше τ , обратного знака усилия обратные токи не создают. При движении знак тока в секциях якорной обмотки меняется для синхронной машины синхронно с движением в связи с питанием якорной обмотки переменным током; для автосинхронной машины (постоянного тока) изменение знака тока обеспечивается коммутатором, например коллектором, синхронизированным с движением тележки.

В режиме генератора наводимые в секциях якорной обмотки ЭДС могут непосредственно использоваться как система напряжений переменного (с частотой движения) тока либо выпрямляться тем или иным способом. Реверсирование двигателя может осуществляться изменением либо знака тока, либо потока возбуждения; регулирование — одновременным или раздельным изменением тока в цепи возбуждения и якоря. Следует подчеркнуть одну особенность машины: благодаря поперечной шихтовке магнитопровода увеличивается магнитное сопротивление на пути потока реакции якоря, что благоприятно сказывается на устойчивости поля машины; особенно высока устойчивость при беспазовой якорной обмотке.

Сердечник 3 шихтован в направлении движения, и это позволяет при перемещении тележки относительно полюсов потока возбуждения перемещаться по сердечнику вдоль движения, тогда как поток, сцепляющийся с якорной обмоткой, всегда проходит поперек движения — вдоль листов магнитопровода 1. Сквозной разрез полюсов позволяет существенно снизить поток реакции якоря. При несквозном разрезе неразрезанная часть полюса представляет собой обход разреза для потока реакции якоря, и при не слишком насыщенной стали полюса указанный поток уменьшается незначительно.

При таком исполнении в коллекторной машине реактивные ЭДС малы, что повышает надежность работы. Если ограничиться для целей регулирования и реверсирования только изменением тока в цепи якорной обмотки, можно существенно улучшить энергетические показатели машины, применив в качестве обмотки возбуждения 2 сверхпроводящий контур с током в соответствующем криостате и организовав в определенном месте подготовку таких контуров с заменой работающих контуров при снижении индукции в рабочем зазоре или после определенного времени

работы. Характер прохождения магнитного потока вдоль полюсов и листов пакета магнитопровода 1 позволяет существенно снизить их массу, так как по мере приближения к краям поток, проходящий через поперечное сечение полюса и магнитопровод 1, уменьшается, что позволяет выполнить высоту полюса и магнитопровода убывающими по мере приближения к краям, соответственно уменьшая их массу, что особенно важно для полюсов, которые в ряде случаев нужно укладывать на многие километры пути. Такая машина может выполняться как универсальная — автосинхронная (постоянного тока), синхронная и асинхронная. В асинхронном варианте несколько (например, три) «модулей» (описанные выше магнитопроводы 1 и 3 с обмоткой возбуждения 2 и якорной обмоткой 5) выполняются с длиной (по направлению движения) кратной двум, и устанавливаются на тележке друг за другом со сдвигом (при трехфазной системе) на $2/3$ длины, их обмотки возбуждения включаются в трехфазную сеть, а якорные секции соединяются соответственно друг с другом, например, последовательно, причем одни концы полученной таким образом общей якорной обмотки закорачиваются, а во вторые включаются регулирующие, пусковые подпитывающие или иные устройства (аналогично, например, асинхронной машине с разноименнополюсной системой, описанной в § 3.2). Преимуществом у этого варианта является уменьшенное вдвое число зазоров на пути магнитного потока, резкое снижение потоков рассеяния и др. Следует отметить, что с одной и той же полюсной системой, установленной на пути, могут взаимодействовать установленные на тележках различные «модули» — синхронные, асинхронные, постоянного тока. Определенные преимущества автосинхронной машины с разрезными полюсами реализуются также в цилиндрической конструкции такого двигателя.

Расчет такой машины показывает, что при полезной мощности $P_z = F_{\text{тм}} v = 15\,000$ Вт КПД $\eta = \frac{P_z}{P_z + \Delta P} = 0,51$. Это неплохой результат для столь низкоскоростной машины (ЛАД близкой мощности имеет при $v = 0,5$ м/с показатели на порядок хуже).

Представляет значительный принципиальный интерес применение в качестве линейного двигателя в определенной степени «автосинхронной» однофазной коллекторной машины переменного тока — репульсионного двигателя. Такой двигатель позволяет благодаря низкому значению якорного напряжения и малой индуктивности якорных секций обеспечить контактную коммутацию (закорачивание работающей в данном положении экипажа части якорной обмотки). Это создает возможность обойтись без самого тяжелого, дорогого и относительно менее надежного элемента системы — тиристорного преобразователя, применение которого особенно затруднительно при размещении якорной обмотки на протяженном пути. Машина представляет собой

развитие конструкции, описанной в [75]. На рис. 3.42 показана схема, поясняющая принцип действия такой машины. Колеса 1 контактируют с токопроводящей шиной 2, контактные выступы 3 секций алюминиевой обмотки 4 (условно показанной на рис. 3.41 в плоскости чертежа) смещены на заданную величину z относительно оси потока обмотки 5, включенной между пантографом 6 (скользящим по питающему проводу 7) и заземлением 8 (например, обычного типа колесо-рельс). Это эквивалентно смещению оси короткозамкнутых щеток относительно оси потока возбуждения у вращающегося репульсионного двигателя и обеспечению наведения в обмотке 4 ЭДС $E_a \approx U \frac{w_a}{w_b} \cos \frac{\pi z}{\tau}$, создающей даже при весьма низком отношении числа витков w_a обмотки якоря 4 к числу витков w_b обмотки возбуждения благодаря низкому значению сопротивления шины 2 значительный ток I_a , при этом возникает значительное тяговое усилие $F \approx I_a \Phi_n \sin \frac{\pi z}{\tau}$.

Таким образом, весь тяговый привод состоит из уложенных на пути поперек движения алюминиевых проводов-шин обмотки 4 с наконечниками 3 (например, медными), закорачивающей шины 2, размещенных на экипаже обмотки 5 и контактных колес 1. Из рис. 3.42 видно, что закороченным оказывается только участок обмотки 4 между первым и вторым (одна ветвь) и вторым и третьим (вторая ветвь) колесами 1. Но каждый участок обмотки 4 находится под током лишь малое время, поэтому допустима высокая плотность тока якоря. Поскольку сосредоточенная обмотка 5 может создать значительную индукцию, для обычных плотностей усилия порядка $(3-4) \cdot 10^4$ Н/м² можно иметь отно-

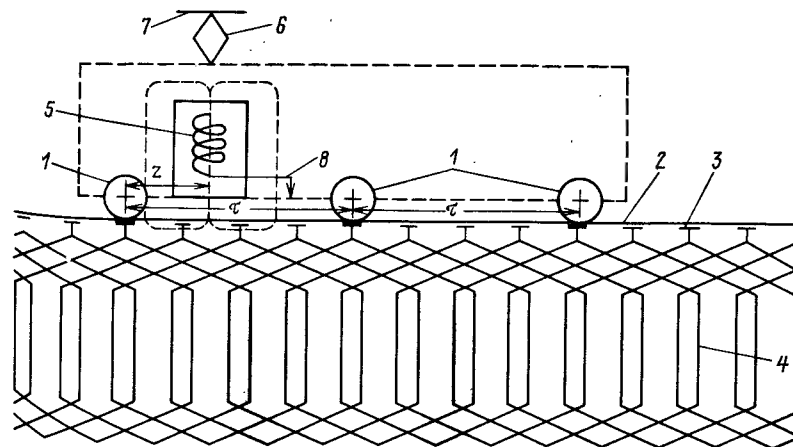


Рис. 3.42. Схема линейного репульсионного двигателя

сительно невысокую линейную нагрузку и, следовательно, уменьшить сечение обмотки 4 (самой дорогостоящей части системы при протяженном пути).

3.5. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

В [71] приводится пример применения обращенного ЛДПТ в качестве безредукторного привода для так называемой электро-страды. Дается описание системы путевых полос, в которые вмонтированы первичные элементы двигателей и с которыми взаимодействуют электропоезда, снабженные только вторичными частями этих двигателей — безобмоточными полюсами (предусмотрены лишь система накопления энергии во время нахождения электропоезда на электростраде для использования ее во время автономного движения вне электрострады).

Безрельсовая многолинейная трасса (рис. 3.43) оборудуется уложенными внутри твердого покрытия первичными частями линейного двигателя с обмотками и расположенными вдоль трассы преобразователями-коммутаторами (или другими источниками энергоснабжения). Экипажи оборудуются полюсной системой, возбуждаемой от автономного источника питания (например, аккумуляторных батарей).

Поскольку грузовые и легковые транспортные средства, как правило, двигаются с различными скоростями, электрострада в

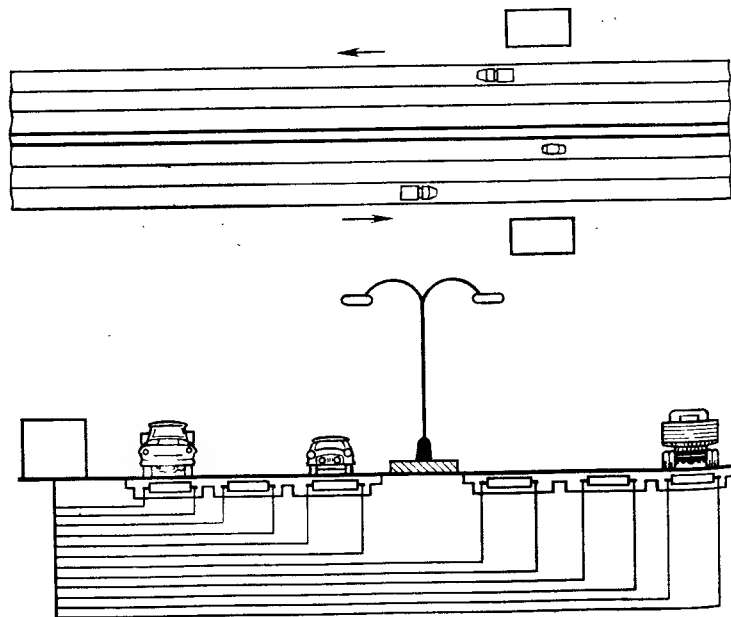


Рис. 3.43. Схема электрострады

каждом направлении должна иметь несколько (например, три) полос для движения в каждом направлении: крайняя левая — для скоростного движения, средняя — для движения грузового транспорта и крайняя правая — для въезда на электростраду и съезда с нее. Для изменения направления движения на электростраде необходимо предусмотреть развязки по типу обычных для автострад. Каждая полоса движения представляет собой отдельную уложенную в твердом покрытии первичную часть с секционированной обмоткой, питаемой синхронным генератором или отдельным преобразователем частоты, фактически задающими скорость движения экипажа. Подключение секции к проложенным вдоль пути питающим шинам или шине осуществляется от датчиков, расположенных так, что управляющий включением какой-либо секции датчик срабатывает несколько ранее, чем экипаж наезжает на эту секцию. Отключение производится от реле времени или датчиком, расположенным на одну-две секции сзади по ходу движения.

Для перехода экипажа с одной полосы движения на другую отключается система возбуждения полюсов, и экипаж переводится на режим движения от автономных двигателей, связанных с валом колес экипажа, и переходит на другую полосу движения или съезжает с электрострады на другое шоссе. Поскольку все транспортные единицы, находящиеся на одной полосе движения и двигающиеся в одном направлении, синхронизируются магнитным полем от одной системы управления, то практически исключается возможность наезда одного экипажа на другой. Кроме того, так как каждый экипаж является самоходной единицей, имеется возможность перемещать экипажи на достаточные расстояния от электрострады и затем возвращать их на нее энергией аккумуляторов. При движении по электростраде автономный двигатель может переводиться в генераторный режим для подзарядки аккумулятора. Вся электрострада в целом может быть оборудована управляющей системой с применением ЭВМ, с помощью которой выбираются оптимальная скорость движения на каждой полосе электрострады и безопасные интервалы между отдельными экипажами. Применение такой системы должно резко повысить пропускную способность электрострады и безопасность движения на ней. Возникающие между экипажами и путем центрирующие силы гарантируют устойчивость подвижной единицы на полосе движения независимо от погодных условий.

Принципиальное решение электрострады основано на применении линейного синхронного двигателя. В обмотках первичной части протекают токи заданной частоты, причем $f_3 > f_2 > f_1$, где f — частота тока в первичной части крайней правой полосы движения. Экипаж в режиме автономного движения ускоряется по крайней правой полосе движения до тех пор, пока его скорость не станет синхронной для данной частоты тока первичной части

f_1 (о чем сигнализирует специальное индикационное устройство на экипаже, выполненное, например, по типу синхронизаторов на электростанциях). После входа в синхронизм движение экипажа происходит с заданной скоростью, определяемой частотой f_1 , экипаж переходит с автономного движения на синхронное, определяемое линейным синхронным двигателем полосы.

Для перехода на новую полосу снова включаются автономные двигатели и экипаж ускоряется до новой синхронной частоты f_2 или f_3 и т. д.

Возможно также на отдельных участках иметь комбинацию принципов синхронного и автосинхронного (постоянного тока) линейных двигателей. При создании электрострады на основных участках, имеющих большие протяженности и не требующих маневрирования, очевидно, предпочтительнее будет использовать линейный синхронный двигатель; там, где требуется иметь возможность широкого маневра по скорости, работать в стартстопных режимах, лучше будет использовать линейный двигатель постоянного тока.

Приведем приближенную оценку параметров такой системы. Мощность двигателя современной легковой машины в среднем равна 50 кВт; при этом обычно исходят из скорости 90—100 км/ч, т. е. расчетной тяги 2000 Н. Можно считать, что мощность легкового экипажа электрострады должна находиться в этих же пределах до той же скорости. Скорости движения по полосам электрострады примем равными:

Полоса I	12,5 м/с (45 км/ч); $F_T \approx 2000$ Н
Полоса II	25 м/с (90 км/ч); $F_T \approx 2000$ Н
Полоса III	50 м/с (180 км/ч); $F_T \approx 8000$ Н

Для последнего случая сила тяги увеличивается, так как основным преодолеваемым сопротивлением будет сопротивление воздуха, пропорциональное квадрату скорости.

Зададимся активной шириной возбужденных полюсов $b_1 = 0,8$ м; их числом $2p = 4$; полюсным коэффициентом $a_1 = 2/3$; линейной нагрузкой $A = 5 \cdot 10^4$ А/м; индукцией в воздушном зазоре $B_\delta = 0,2$ Тл; $K_{эв} \approx 0,2$ (при разрезных полюсах, как рассмотрено выше).

Зазор между подвижным экипажем и электрострадой, т. е. между первичной и вторичной частями линейного двигателя, примем равным $\delta = 40$ мм (20 мм — заглубление первичной части в твердом покрытии и 20 мм — воздушного зазора между путем и выдвинутой вниз до рабочего положения вторичной частью на экипаже). Следует отметить, что при съезде с электрострады и переходе экипажа в автономный режим движения зазор (клиренс) целесообразно увеличивать до 200—250 мм, что может быть достигнуто переводом вторичной части в верхнее «транспортное» положение.

Из соотношения, определяющего силу тяги экипажа,

$$F_T = a_1 A B_\delta b_1 L (1 - K_{эв})$$

определим длину вторичной части $L \approx 2$ м; исходим из $F' = a_1 A B_\delta (1 - K)_{эв} = 0,54 \cdot 10^4$ Н/м². Зная вышеприведенные параметры машины, можно определить полюсное деление $\tau = 0,5$ м, ширину полюса $a_\tau = 0,33$ м, суммарную МДС, равную 22 000 А. При отношении $\tau/\delta > 20$, что имеет место в настоящем расчете, реальные результаты достаточно близки к расчетным. Частоты переключения тока в секциях обмотки первичной части для каждой полосы движения:

Полоса I	12,5 Гц
Полоса II	25 Гц
Полоса III	50 Гц

Ток возбуждения I_B , А	10
Плотность тока j , А/мм ²	3
Число витков катушки возбуждения w	2200
Масса меди катушки m_m , кг	90
Масса магнитопровода $m_{ст}$, кг	150

Для оценки параметров грузового экипажа примем его мощность около 110 кВт. Так как частоты полос движения электрострады одинаковы для легковых и грузовых экипажей, то сохраним без изменения τ и L , чтобы использовать одни и те же полосы для грузового и легкового движения. Тогда сила тяги грузового экипажа $F_{гр} \approx 4400$ Н, и при $v = 180$ км/ч сила тяги увеличивается до значения $F_T \approx 17\,500$ Н. Оставляя линейную нагрузку и индукцию в зазоре $B_\delta = 0,2$ Тл без изменений, может оставить для $F_{гр} = 4400$ Н число полюсов $2p = 4$ и $\tau = 0,5$ м. При $F_T = 17\,500$ Н потребуется $2p = 8$ и $L = 4$ м. Для создания индукции $B_\delta = 0,2$ Тл необходима та же МДС 22 000 А.

Массы меди катушки и магнитопроводов будут соответственно составлять: $m_m \approx 180$ кг, $m_{ст} \approx 300$ кг.

Сила, с которой будет притягиваться подвижная часть машины к неподвижной, для легковой машины равна 6400 Н (для полосы III — 25 600 Н), для грузовой машины 14 000 Н (для полосы III — 56 000 Н).

Сам по себе принцип электрострады был предложен замечательным ученым-инженером Г. И. Бабатом и описан им, в частности, в [5] в виде высокочастотного транспорта (ВЧТ). Этот принцип был практически реализован им в 1943 г. Определенные модификации этой системы применяются и в настоящее время.

На рис. 3.44 показана принципиальная схема ВЧТ — схема энергоснабжения высокочастотного транспорта: I—IV — отдельные участки подземной бесконтактной тяговой сети; C_c — конденсаторные батареи, обеспечивающие циркуляцию реактивного тока. Генераторы токов высокой частоты (ТВЧ), питающие от-

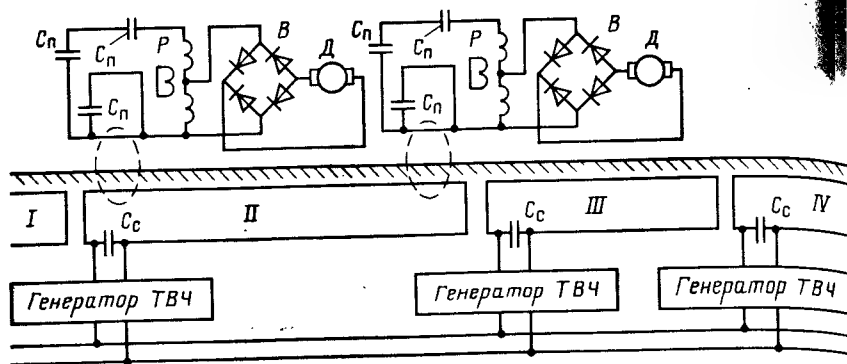


Рис. 3.44. Схема энергоснабжения высокочастотного транспорта по Г. И. Бабату

дельные участки бесконтактной сети, включаются в работу только тогда, когда над данным участком есть потребитель энергии. Над участком II показаны две машины. Пунктиром показаны магнитные силовые линии, сцепляющие проводники приемных контуров с проводниками бесконтактной сети. C_n — конденсаторы приемного контура, P — регулятор мощности, B — выпрямитель, необходимый для питания тягового двигателя D . Вдоль дороги протягивается бесконтактная сеть. Это может быть подвешенная над дорогой воздушная или подземная сеть (кабельная или из проводников в каналах). Такая сеть является первичной обмоткой высокочастотного трансформатора. На машинах устанавливаются приемные витки — вторичные обмотки трансформаторов. Они настраиваются в резонанс с частотой тока в сети при помощи конденсаторных батарей.

Бесконтактная сеть создает над дорогой зону, насыщенную электромагнитной энергией. Магнитные силовые линии связывают между собой проводники сети и приемных контуров на машинах. При помощи электромагнитной индукции передача энергии может происходить с достаточно высоким КПД на расстоянии, не превышающем ширину бесконтактной сети. Практически при ВЧТ бесконтактная передача энергии происходит на расстоянии в несколько метров (но в некоторых специальных случаях это могут быть и десятки метров).

КПД передачи от бесконтактной сети к приемным контурам зависит от частоты тока. С повышением частоты тока уменьшаются потери в проводниках, но возрастают потери в окружающей среде — на паразитные вихревые токи в грунте, на излучение. На рис. 3.45 показан график зависимости относительных потерь энергии Δp , %, от частоты тока f при передаче от бесконтактной подземной сети. Существует оптимальная частота $f_{\text{опт}}$, при которой бесконтактная передача энергии происходит с наименьшими потерями. Эта частота зависит от конструкции

рис. 3.45. Зависимость относительных потерь энергии от частоты тока при передаче от подземной бесконтактной сети

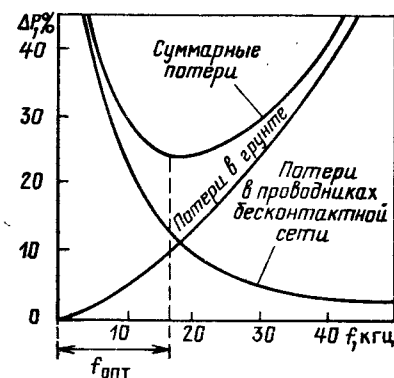
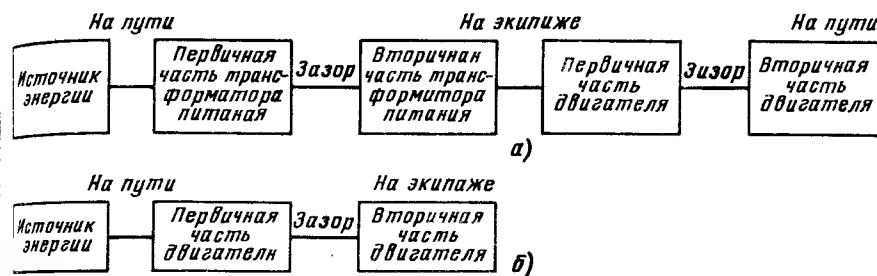


рис. 3.46. Схемы питания линейных электродвигателей



бесконтактной сети, от электрических характеристик окружающей среды; она может находиться в пределах от нескольких килогерц до нескольких десятков килогерц.

Для движения машины вне электростреды необходим аккумулятор. В [5] Г. И. Бабат указывает, что в качестве аккумулятора может быть применен быстро вращающийся маховик, соединенный с электрической машиной. При заряде эта машина работает как двигатель, получая энергию от высокочастотной сети, скорость маховика при этом увеличивается. При разряде, наоборот, маховик вращает электрическую машину, она работает в генераторном режиме и питает ток двигателя. Маховичный аккумулятор допускает многочисленные кратковременные заряды и разряды. Энергоемкость его не ниже, чем, например, у свинцовых аккумуляторов. Маховичный агрегат весом в 100 кг может обеспечить передвижение небольшой машины на несколько километров.

Если в городе проложить даже относительно редкую сетку высокочастотных магистралей, то машины ВЧТ смогут передвигаться во всех направлениях. Были изготовлены экспериментальные грузовые автомобили с высокочастотным питанием. Приемный контур располагался внизу под машиной. Бесконтактная сеть была натянута на столбиках с изоляторами вдоль дороги.

В начале 50-х годов в СССР был выполнен ряд экспериментальных установок ВЧТ. В частности, несколько месяцев работала на одной из шахт Донбасса подземная линия ВЧТ для откатки угля.

В [1] системы бесконтактного энергоснабжения такого типа рассматриваются как способ питания экипажей для высокоскоростного наземного транспорта; следовательно, закономерно их сравнение с обращенным линейным электроприводом, рассмотренным выше. В обоих случаях решается одна и та же задача — обеспечение движения при скоростях, превышающих допустимые для современного контактного энергоснабжения типа троллей-пантограф.

Из рассмотренных в [1] индукционной, емкостной и волновой систем передачи энергии к движущемуся экипажу для нас наиболее приемлема индукционная.

Можно согласиться с приводимым в [1] мнением, что описанные методы имеют следующие недостатки: а) индукционный (магнитный) — низкий КПД, большие размеры и низкие механические ограничения; б) емкостный — множество технических и экономических проблем, обусловленных применением высокого напряжения частотой 100 кГц; в) волновой — высокая стоимость материалов для производства и передачи энергии, увеличенная масса экипажа. Ведь системы только передают мощность на первичную часть двигателя, размещенную на экипаже. При использовании этой энергии в линейном электроприводе должна быть еще одна система силового взаимодействия со вторичной частью двигателя, размещенной на пути. Но вдоль всего пути должна быть размещена и питаемая от соответствующих подстанций система первичных обмоток трансформаторов, не слишком экономичных из-за больших зазоров на пути рабочего магнитного потока. Эта система обмоток довольно близка по своим параметрам (затратам материалов, стоимости установки на пути, системе подключения участков к первичной части) соответствующей системе обращенной машины. Итак, в случае питания прямого линейного двигателя от бесконтактной системы питания, размещенной вдоль пути, имеем схему, показанную на рис. 3.46, а, а для обращенной машины — более простую схему на рис. 3.46, б.

Если считать примерно равноценными первичную часть трансформатора питания и первичную часть двигателя у обеих схем, то первая проигрывает в суммарной стоимости первичных частей двигателей и вторичных частей трансформаторов на всех экипажах; технико-экономические преимущества, по-видимому, на стороне рассматриваемых нами «магнитомобилей». Конечно, если на экипаж нужно подать значительную энергию при большой скорости движения без генераторов, получающих механическую энергию от самого движения (по типу, например, генераторов экипажей элетрострады), использование бесконтактной передачи

энергии представляет существенный интерес. Однако при наличии обращенного линейного электропривода как источника движения необходимая не слишком большая доля энергии (на возбуждение, освещение, подзарядку аккумулятора и т. п.) может быть получена при наличии колес и связанных с ними электрических машин, используемых в режиме генераторов; при отсутствии последних или вообще при отсутствии колес — от генераторов, работающих от встречного потока воздуха, от токов в проводах, уложенных во вторичную часть, например, при обращенном линейном асинхронном двигателе, у которого во вторичной части имеется обмотка.

Электромобили уже созданы. Разработаны и применяются для различных целей обращенные линейные двигатели. Можно полагать, что при создании электрострад огромное скопление транспортных средств не будет отравлять атмосферу, движение будет быстрым, более безопасным, экономичным, удобным для автоматизации с помощью современных средств управления, а экипажи будут возить с собой лишь небольшой запас энергии, легко возобновляемый на ходу. Это дело вполне обозримого будущего.

3.6. ДУГОСТАТОРНЫЙ БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Безредукторные дугостаторные электроприводы получили в СССР значительное развитие. Так, еще в 30-е и в начале 40-х годов были рассчитаны, осуществлены и испытаны пять пробных конструкций аналогичных устройств в виде сегментных статоров для хлопковых кардмашин и одна конструкция для хлопкового очесывающего валика [103]. Дуговые статоры для кардмашин серийного промышленного выпуска находились в регулярной эксплуатации. Заводом «Электросила» был построен опытный сегментный статор для шаровой углеразмольной мельницы мощностью 400 кВт при 3000 В на 28 об/мин.

Таганрогский завод «Красный котельщик» выпустил в марте 1941 г. первую безредукторную шаровую мельницу промышленного типа с электроприводом системы инж. П. А. Фридкина производительностью 11 т/ч. Одновременно с Таганрогским заводом такую же мельницу производительностью 16 т/ч выпустил Ленинградский металлический завод. Бюро безредукторных электроприводов, существовавшее на заводе «Электросила» им. Кирова, изготовило действующую модель новой оригинальной конструкции грязевого насоса для нефтяных скважин с электроприводом системы инж. П. А. Фридкина. Эта модель представляла компактный единый агрегат, в котором электропривод и насос — одно целое. Непосредственно на коленчатый вал насоса насажен маховик, одновременно выполняющий функции ротора. Сверху, над маховиком на раме насоса, установлен сегментный статор.

Таблица 3.8. Данные дуго

Тип статора	Мощность на два статора, кВт	Синхронная скорость, об/мин	Габаритные размеры $L \times H \times B$, мм	Окружающее усилие двух статоров, кН
СД16-254-115-90	6	300	716×300×255	630
СД25-254-115-145	9	300	716×300×310	947
СД40-405-107-170	20	220	103×360×340	1770
СД63-405-107-250	36	220	103×360×420	3185
СД160-555-96-210	60	200	1300×465×570	4082
СД250-555-96-330	90	200	1300×465×690	6122
СД400-755-94-400	150	150	1625×490×780	9960

Продолжается использование подобных машин и в послевоенное время. Если по линейным двигателям в нашей стране есть десятки интересных разработок, есть действующее уже около 25 лет ОКБ ЛД, но нет пока (к 1988 г.) ни одного завода, осуществляющего серийный выпуск таких двигателей*, то дугостаторные электродвигатели нескольких типов серийно выпускаются промышленностью. В табл. 3.8 приведены основные данные этих машин. Следует отметить, что только относительно мощные машины (150 кВт) выпускаются с синхронной частотой вращения $n_c = 150$ об/мин, заметно отличающейся от достигаемой (см. табл. 2.3) у обычных многополюсных ($2p = 16$) асинхронных машин $n_c = 376$ об/мин. У дугостаторной машины мощностью 6 кВт синхронная частота вращения $n_c = 300$ об/мин. При этом массогабаритные показатели одинаковые или немного ниже, а энергетические показатели заметно ниже у дугостаторных машин. У такой машины мощностью 150 кВт $m' = 11,8$ кг/кВт (только по массе статоров), тогда как у близкой по мощности 16-полюсной обычной машины по всей массе машины имеем $m' = 11,3$ кг/кВт. Если принять, что масса ротора составляет примерно $\frac{1}{3}$ от всей машины, то сравниваемая величина $m' \approx 7,5$ кг/кВт; если учесть и разницу в частоте вращения, имеем приведенное значение $m' \approx 7,45 \sqrt{\frac{375}{150}} \approx 11,8$ кг/кВт, как и у дугостаторной машины. Но если у рассматриваемой 16-полюсной

* Очень жаль, что приведенные в 1973 г. в гл. 7 [111] сведения о существовании дороги Киев — аэропорт и городского трамвая с линейным тяговым приводом и через 15 лет еще не соответствуют действительности...

статорных машин серии СД

Масса одного статора, кг	m' , кг/кВт	Внутренний диаметр дуги, мм	Угол охвата маховика, град	$S_{ср}$, см ²	Высота пакета железа, мм	Удельное усилие, Н/см ²	Мощность на 2 статора, кВА	$\eta \cos \phi$
95	31,7	508	115	2,546	90	0,55	32	0,187
122	21,7	508	115	2,880	145	0,54	50	0,18
220	22	810	107	2,1555	170	0,57	80	0,25
290	16,1	810	107	2,2388	250	0,67	120	0,3875
460	15,3	1110	96	2,2321	210	0,88	320	0,1875
600	13,3	1110	96	2,3647	320	0,84	500	0,18
890	11,8	1510	94	2,6264	400	0,8	800	0,1875

машины $\eta \cos \phi \approx 0,68$, то у дугостаторной машины $\eta \cos \phi \approx 0,188$ — в 3,6 раза ниже.

Тем не менее у дугостаторных машин есть своя определенная область применения — в основном для бескорпусных приводов, где ротором такой машины является присущая самой конструкции механизма часть. Поэтому считать в дугостаторной машине какую-то эквивалентную массу ротора (или не считать массу ротора у сравниваемой с ней обычной машины) не совсем корректно. Дугостаторная машина в этом случае имеет лучшие массогабаритные показатели, уступая все же по значению энергетического фактора $\eta \cos \phi$. По дугостаторным машинам имеется значительное количество книг и статей (например, [97], [100], [103] и др.). Мы ограничимся здесь лишь некоторыми сравнительными оценками и рассмотрением имеющихся интересных разработок дугостаторных двигателей постоянного тока (ДДПТ). Этим двигателям труднее найти себе бесспорную область преимущественного применения — создать машину постоянного тока на малые частоты вращения легче, чем машину переменного тока при промышленной частоте питающего тока, а массогабаритные и особенно энергетические показатели у обычной машины постоянного тока выше. Но поскольку, особенно при бескорпусном выполнении, могут представить интерес и ДДПТ, в частности, с безобмоточным возбужденным ротором (впрочем, и у обычной МПТ вполне возможно выполнение такого типа ротора — с когтеобразными полюсами или с двухфункциональной статорной обмоткой — см. § 3.3), приведем из [6] соответствующие описания таких принципиальных конструкций. Конструктивная схема ДДПТ с продольным замыканием основного магнитного потока (рис. 3.47) включает в себя дуговой статор I ,

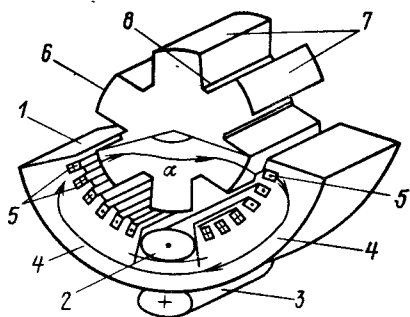


Рис. 3.47. ЛДПТ с продольным замыканием основного магнитного потока

представляющий собой часть кругового кольца, в центральной части которого выполнен большой паз 2 для размещения обмотки возбуждения 3. Симметрично этому пазу по обе его стороны располагаются два одинаковых дуговых участка магнитопровода якоря 4, на которых выполнены пазы для

укладки якорной обмотки 5. Ротор-формирователь магнитного поля 6 представляет собой ферромагнитное зубчатое колесо, зубцы которого 7 выполняют роль полюсообразующих выступов, разделяемых впадинами 8. Суммарная длина дуги дугового статора двигателя с продольным замыканием основного магнитного потока может составлять как четное, так и нечетное число полюсных делений.

В [6] приведена также конструкция дугостаторного двигателя постоянного тока с поперечным замыканием основного магнитного потока, а также с продольно-поперечным замыканием основного магнитного потока. У этого двигателя секции обмотки якоря являются общими для магнитопроводов, а ротор-формирователь поля выполнен из двух цилиндрических магнитопроводов, объединенных ферромагнитной цилиндрической втулкой таким образом, что зубцы магнитопроводов ротора располагаются относительно друг друга в шахматном порядке.

Известны разработки синхронных дугостаторных машин с возбуждением от постоянных магнитов [97]. Основное применение здесь нашли информационные микромашины — тахометры.

Дугостаторные машины — интересное, но отнюдь не универсальное решение задачи безредукторного электропривода.

ГЛАВА 4

БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ МАШИН ДВОЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАШИН ДВОЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Анализ, проведенный в предыдущих главах, позволяет сделать вывод о фундаментальном недостатке любого низкоскоростного безредукторного электропривода — малой эффективности взаимодействия контуров тока и потока при невысокой скорости изме-

нения потокосцепления. Действительно, электромагнитная мощность машины $S = mEI$, где E — ЭДС; I — ток; m — число фаз. В общем случае ЭДС обмотки $e = -d\psi/dt$, или при установившейся частоте вращения $E = \omega\Phi\omega$. Если малы $d\psi/dt$ либо ω , то мала и ЭДС E . В рамках обычных представлений о равенстве скоростей выходной оси привода и перемещения ротора относительно статора при отсутствии редуктора этот недостаток представляется непреодолимым. Это в самом деле так, пока движение происходит в одной какой-либо координате; один из элементов машины должен быть закреплен, чтобы, опираясь на него, мог под воздействием электромагнитных сил перемещаться второй элемент.

Актуальность задачи создания безредукторного электропривода с высоким использованием рабочего объема и приемлемыми характеристиками при малых скоростях движения выходной координаты привода привела к созданию нового типа электрической машины — двойного движения — с движущимся в разных плоскостях ротором и статором (сохранив за медленно движущимся элементом машины уже не соответствующее ему в строгом смысле слова прежнее название «статор»). Как это часто бывает в развитии какого-либо нового направления, элементы технического решения уже были подготовлены ранее. Так, до появления машин двойного движения уже были известны работы А. И. Москвитина [34] в области создания электрического молотка с винтовой нарезкой на наружной поверхности ротора и на внутренней поверхности статора — ротор здесь совершает вращательное и поступательное движение, а статор остается, как положено, неподвижным. Варианты такого решения запатентованы во многих странах мира. Делались также многочисленные попытки электрифицировать известные механические соединения винт-гайка или червяк-червячное колесо. Одной из относительно недавних таких попыток является конструкция, изображенная на рис. 4.1. Здесь муфта 2 сцепляется с винтом 1 лишь при подаче напряжения к подводам 3 катушки 4; при движении вдоль направляющей 5 муфта 2 может сжимать пружину 6, возвращающую муфту назад при снятии напряжения с подводом 3. На рис. 4.2 показан вариант выполнения такой схемы, когда муфта неподвижна, а винт совершает одновременно вращательное и поступательное движение — как в двига-

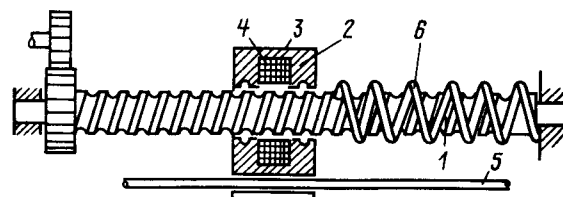


Рис. 4.1. Электромагнитная система винт — гайка с подвижной гайкой

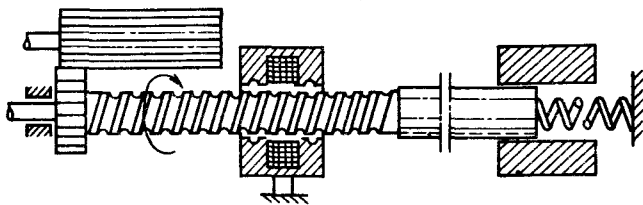


Рис. 4.2. Электромагнитная система винт — гайка с перемещаемым винтом

теле-электромолатке А. И. Москвитина, упомянутом выше. В нашем рассмотрении систем безредукторного электропривода именно этот двигатель А. И. Москвитина явился отправной точкой для создания машины двойного движения (МДД). Рассмотрим вначале МДД вращательного типа — низкоскоростной безредукторный привод [76].

Целью разработки являлось принципиальное расширение функциональных возможностей электрической машины путем обеспечения двух независимых видов движения: медленного вращения статора и быстрого вращения ротора, что осуществляется путем снабжения ротора опорно-осевыми подшипниками и расположением его оси перпендикулярно оси вращения статора. Ниже будет проведено принципиальное сравнение пределов упругости электромагнитной системы (с учетом ее площади сцепления) и механической системы с ее площадью сцепления. Рассматриваемые системы имеют соизмеримые габаритные размеры. Но предварительно хотелось бы подчеркнуть существенное эксплуатационное различие: при резком превышении нагрузки у машины двойного движения ее можно будет снова включить, уменьшив нагрузку; гораздо трудней восстановить работу механической системы с деформированными поверхностями.

Рассмотрим конструктивное выполнение МДД. На рис. 4.3 изображена описываемая машина для случая, когда на роторе размещается якорная обмотка.

Машина содержит статор 1, установленный на валу 2, и ротор 3 — на валу 4. Ротор 3 имеет коллектор 5, ток к которому подводится щетками 6. На поверхности ротора имеются нарезка 7 и пазы 8 вдоль образующей цилиндрической поверхности ротора, в которые уложена обмотка 9. Полюса 10 расположены на ободе статора 1. Их дуга относительно поверхности ротора 3 выбирается такой, чтобы образовалась часть полнополюсной системы, например, дуга каждого полюса 60° с промежутком между ними в 30° образует часть полнополюсной системы с числом полюсов $2p=4$. Между полюсами 10 имеются углубления 11, в которые уложена обмотка 12. На поверхности полюсов 10 выполнена винтовая нарезка: выступы 13 и углубления 14 винто-

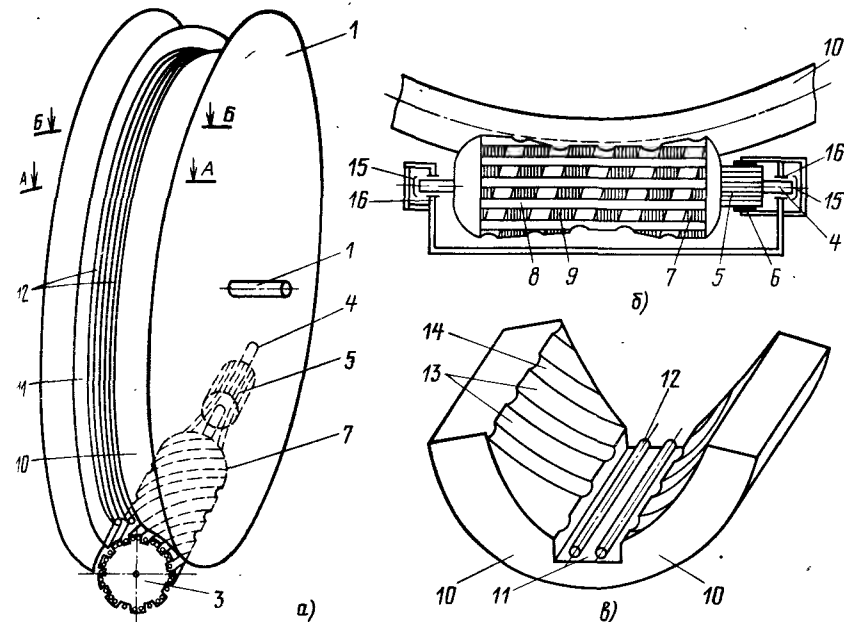


Рис. 4.3. Машина двойного движения:
а — общий вид; б — вид сбоку на нижнюю часть двигателя; в — вид сверху на деталь обода статора

вой нарезки. Ротор 3 машины установлен в опорно-осевых подшипниках 15 и радиальных подшипниках 16.

При подаче напряжения на щетки 6 коллектора 5 ротора 3 в его якорной обмотке 9 возникают токи, взаимодействие которых с магнитным потоком полюсов 10 статора 1, созданным, например, обмоткой 12, уложенной кольцом в углублении 11 обода колеса статора 1, вызовет появление вращающего момента на поверхности ротора 3. Ротор начнет вращаться в подшипниках 15 и 16, но если при включении выступы винтовой нарезки 7 на поверхности ротора 3 и выступы винтовой нарезки 13 на поверхности полюсов 10 статора совпадут, то при повороте ротора в неподвижных полюсах выступы 7 винтовой нарезки ротора начнут сдвигаться в сторону углублений 14 винтовой нарезки на поверхности полюсов 10, вызывая уменьшение магнитного потока, сцепляющегося с обеими поверхностями. Это вызовет появление препятствующего изменению потока усилия, приложенного в противоположных направлениях вдоль оси ротора 3 и вдоль касательной к окружности полюсов 10 колеса статора 1; но осевому перемещению ротора 3 препятствуют опорно-осевые подшипники 15. Следовательно, под воздействием касательного усилия, пропорционального $dW/d\xi$ (где W — магнитная энергия в зазоре между полюсами 10

и ротором 3, а ξ — относительное перемещение выступов винтовых нарезок на их поверхности), колесо статора 1 начнет поворачиваться вместе с выходным валом 2 вокруг своей оси с линейной скоростью поверхности полюса, во столько же раз меньшей линейной скорости на поверхности ротора 3, насколько приходящееся на один оборот ротора смещение выступа винтовой нарезки (шаг резьбы) меньше длины окружности ротора 3. Соответственно это касательное усилие будет во столько же раз больше касательного усилия на поверхности ротора 3. Отношение угловых скоростей вала 2 колеса статора 1 к угловой скорости вала 4 ротора 3 будет еще меньше отношения упомянутых линейных скоростей (пропорционально отношению радиусов поверхности ротора 3 и поверхности полюсов 10 колеса статора 1) и во столько же раз больше момент на выходном валу.

Таким образом, в машине реализуется двойное раздельное движение: статор 1 осуществляет поворот или медленное вращение вокруг оси 2, перпендикулярной к оси 4 ротора 3, совершающего быстрое вращение.

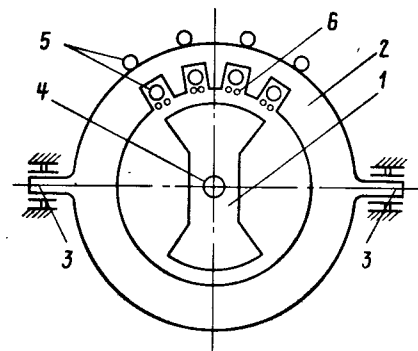
Медленное вращательное движение статора при быстром вращении ротора позволяет существенно уменьшить количество необходимых для осуществления такого привода активных материалов, в частности проводниковой меди, уменьшить габаритные размеры и металлоемкость конструкции, резко снизить шум.

Применение МДД может оказаться особенно эффективным при передаче движения внутрь герметизированного объема; возможно ее использование в качестве генератора, особенно гидрогенератора, с медленным вращением рабочего колеса. Для повышения мощности в заданном габарите возможно помещение нескольких роторов вокруг одного статора.

Рассмотрим еще несколько конструктивных модификаций МДД. Наиболее простой в выполнении и эффективной по полученным характеристикам оказалась машина с медленным поступательным движением статора при быстром вращательном движении ротора [76]. На рис. 4.4 показана принципиальная конструктивная схема (разрез) такой машины, выполненной по типу двухфункциональной машины постоянного тока с возбужденными безобмоточными полюсами, подробно рассмотренной в гл. 3. Двигатель содержит ротор 1, статор 2, направляющие 3, которые расположены на статоре 2. Вал 4 ротора 1 снабжен радиальными подшипниками и опорно-осевыми подшипниками (на рисунке не показаны), препятствующими смещению ротора 1 вдоль оси вала 4. На статоре 2 размещена обмотка 5 и может быть размещена дополнительная обмотка 6, наматываемая на зубцы статора 2.

Работает двигатель следующим образом. Обмотка 5 статора 2 выполнена двухфункциональной. Коммутационная система (не показана на рисунке) подключает секции обмотки 5 к цепям

рис. 4.4. Принципиальная конструктивная схема МДД с поступательным движением



якорного напряжения и напряжения возбуждения таким образом, что секции, в данный момент находящиеся под полюсом ротора 1, выполняют роль якорных, а секции, находящиеся над межполюсным пространством, — роль обмотки возбуждения ротора 1.

При включении ротор 1 начинает вращаться, возникает смещение между выступами винтовых нарезок (на рисунке не показаны) ротора 1 и статора 2 и создается сила, действующая на ротор и статор в осевом направлении. Однако ротор, ограниченный опорно-осевыми подшипниками, не имеет соответствующей степени свободы — перемещение осуществляется статором, снабженным направляющими 3 в сторону, соответствующую при данном наклоне винтовой нарезки направлению вращения ротора. Линейная скорость движения статора 2 будет во столько же раз меньше линейной скорости окружности ротора, во сколько раз шаг винтовой нарезки меньше длины окружности поверхности ротора, а приводное усилие примерно во столько же раз больше.

В подобной электрической машине двойного движения может использоваться в качестве базовой любая известная электрическая машина. Работать МДД может в любом из известных режимов: двигательном, генераторном, в качестве шагового линейного двигателя, сельсина. На рис. 4.5 фото МДД поступательного движения, выполненной по типу асинхронной машины ферромагнитным массивным ротором.

Выполнив машину по рис. 4.4 обращенной, т. е. разместив безобмоточные полюса на статоре, а обмотки — на роторе и поместив между ротором и статором герметическую обойму из немагнитопроводного материала, можно было бы осуществлять медленное безредукторное перемещение рабочего органа в совершенно герметизированном помещении.

Вполне возможно в герметизированной капсуле располагать и ротор двигателя, изображенного на рис. 4.4. Затруднения с подводом тока к обмотке возбуждения могут быть преодолены применением в качестве этой обмотки кольца сверхпроводящего кабеля

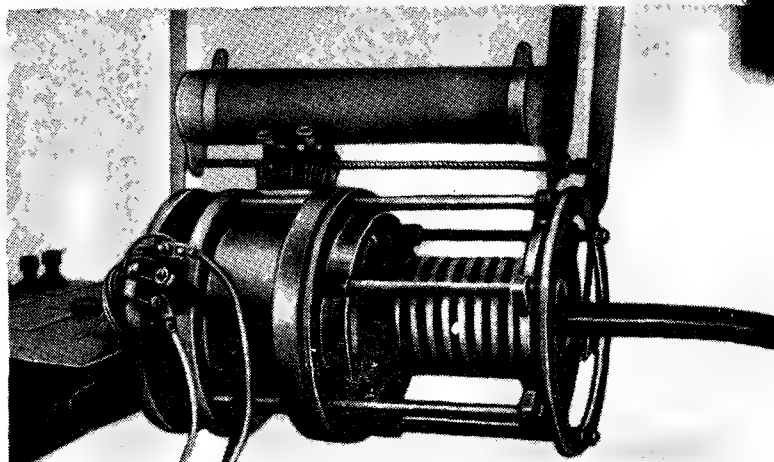


Рис. 4.5. Макетный образец МДД с поступательным движением

с током; если один из полюсов 8 колеса 1 съемный, то смена таких колец через заданное время не представляет трудностей. Однако самым простым решением и в этом случае будет использование безобмоточных полюсов — либо выполнить обмотку 7 ротора 3 двухфункциональной, как уже указывалось выше, либо использовать принцип подведения к полюсам потока, примененный у машин с коттеобразными полюсами; можно выполнить полюса 8 из постоянных магнитов. Наконец, если выполнить обмотку 7 на жестком каркасе, укрепить этот каркас с помощью отдельных стоек неподвижно и предусмотреть зазор между поверхностью кольца и каркасом обмотки 7, не потребуются щетки и кольца для питания этой неподвижной катушки.

Разберем еще некоторые принципиальные варианты выполнения МДД по [78]. Ротор может быть выполнен в виде полого цилиндра, состоящего из не связанных между собой продольных зубцов, между которыми размещены электропроводящие стержни, соединенные по торцам цилиндра электропроводящими кольцами, а в полости ротора размещен неподвижный индуктор с обмотками (рис. 4.6).

Электрическая машина содержит полюса 1 и 2 статора, прикрепленные к ободу колеса 3, установленного на валу 4, вращающегося в подшипниках 5. На внутренней поверхности полюсов 1 и 2 нанесена винтовая нарезка 6. На валу 7, неподвижно закрепленном в стойках 8 и 9, укреплена внутренняя неподвижная часть

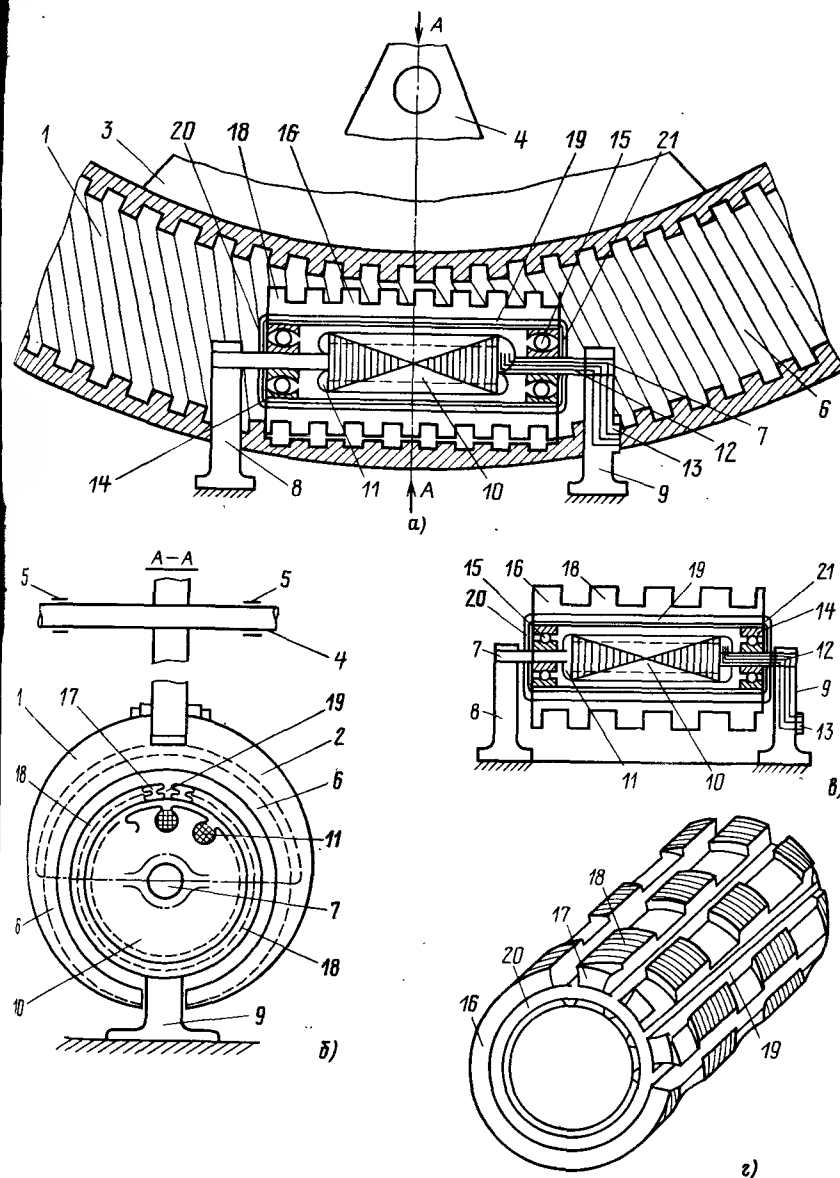


Рис. 4.6. МДД с ротором в виде полого цилиндра:
а — общий вид с одним снятым полюсом; б — разрез А — А; в — продольный разрез;
г — полый цилиндр ротора без стержней и замыкающих торцевых колец

машины 10, в пазах которой уложена обмотка 11, связанная через токоподводы 12, проходящие внутри вала 7 и вдоль стойки 9, с зажимами 13. На обоих концах вала 7 внутри пространства, ограниченного стойками 8 и 9, установлены опорно-осевые подшипники 14 и 15, на наружные обоймы которых насажен полый цилиндрический ротор 16, состоящий из магнитно не связанных между собой зубцов 17 (сплошных или набранных из магнито-проводящих листов). На наружной поверхности этих зубцов выполнена винтовая нарезка 18, аналогичная нарезке 6 на полюсах 1 и 2; токопроводящие стержни 19 уложены (например, залиты) в пространстве между зубцами 17 (в пазах ротора 16) и замкнуты с обоих торцов ротора 16 токопроводящими кольцами 20 и 21. Выполнение ротора 16 легко осуществить, например, установив в соответствующий кокиль магнито-проводящие зубцы 17 с наружной винтовой нарезкой 18 и залив кокиль токопроводящим материалом с внутренним и наружным припусками и последующей проточкой по обеим поверхностям ротора 16.

При выполнении наиболее простой модификации предлагаемой машины (асинхронной) полюса 1 и 2 выполняют роль спинки вторичной машины. При подаче многофазного напряжения к зажимам 13 токи в обмотке 11 создадут вращающийся магнитный поток, проходящий по пути (штрихпунктирная линия на рис. 4.6); внутренняя неподвижная часть машины 10, внутренний воздушный зазор, зубцы 17 полого цилиндрического ротора 16, их выступы винтовой нарезки 18, внешний воздушный зазор, выступы винтовой нарезки 6 полюса (например, полюса 1), спинка полюса 1, спинка полюса 2, снова выступы винтовой нарезки 6 полюса 2, снова внешний воздушный зазор, выступы винтовой нарезки 18, зубцы 17 ротора 16, снова внутренний воздушный зазор и, замыкая путь, снова внутренняя неподвижная часть машины 10.

Взаимодействие вращающегося потока, создаваемого обмоткой 11 с токами в короткозамкнутой клетке, образуемой стержнями 19 и замыкающими кольцами 20 и 21, приводит во вращение ротор 16. При этом возникает изменение магнитной энергии W во внешнем воздушном зазоре между выступами винтовых нарезок 18 (ротора 16) и 6 (полюсов 1 и 2) и появляется касательное усилие, пропорциональное $dW/d\xi$, где ξ — относительное смещение упомянутых выступов. Но ротор 16 вдоль своей оси перемещаться не может из-за наличия опорно-осевых подшипников 14 и 15. Под воздействием указанного касательного усилия полюса 1 и 2 начинают перемещаться и поворачивать колесо 3 вместе с рабочим валом 4 в подшипниках 5 с моментом, примерно равным моменту, возникающему на внутренней поверхности ротора 16, умноженному на произведение отношения длины окружности поверхности ротора 16 к шагу винтовой нарезки 18 (6) и отношения радиуса колеса 3 к радиусу ротора 16 — это произведение может достигать весьма значительной величины. При необходимости можно

установить вокруг колеса 3 несколько роторов 16 с внутренними неподвижными частями 10 и получить требуемый момент в заданном габарите.

Аналогично могут быть выполнены модификации машины двойного движения с промежуточным ротором синхронного и автосинхронного (постоянного тока) типов. В этом случае колесо с прикрепленными полюсами и внутренний статор практически остаются такими же, но полый цилиндр ротора выполняется из магнитно-разделенных полюсов, на наружной поверхности которых нарезается винтовая нарезка. Полюсы возбуждаются размещенными на них обмотками, и ток возбуждения к этим обмоткам подается с помощью двух колец и щеток либо через кольцевой трансформатор сельсинного типа (при установке на роторе вращающихся выпрямительных элементов), либо (предпочтительней) поток возбуждения подводится к этим полюсам от неподвижных обмоток возбуждения аналогично, например, системе подачи потока в бесконтактном сельсине. Для синхронной машины вывод обмотки внутреннего статора к зажимам производится так же, как и в рассмотренной выше асинхронной машине. Для автосинхронной (постоянного тока) машины отличие состоит только в том, что на зажимы выводятся все коммутируемые секции якоря и на валу внутреннего статора устанавливается датчик положения, управляемый коммутатором, переключающим секции якорной обмотки в функции их положения относительно полюсов ротора. Если при этом установить на якоре так называемую двухфункциональную обмотку, у которой коммутатор подключает секции, в данный момент находящиеся против полюсов, к якорной цепи, а секции, находящиеся в межполюсном пространстве, к цепи возбуждения, то отпадает необходимость в размещении обмотки возбуждения на роторе или подведении к его полюсам потока извне.

Преимущества введения промежуточного ротора представляются существенными и в этом случае. Используются традиционные для электромашиностроения основные узлы — фазный ротор асинхронной машины или ротор машины постоянного тока с якорной обмоткой, но без коллектора.

Для синхронной машины снимаются затруднения, которые могло вызвать применение колец и щеток в якорной цепи, что особенно важно для высоковольтных машин. В модификации с промежуточным ротором не только сохраняются все достоинства прямого выхода якорных обмоток во внешнюю цепь, но и возникает дополнительная возможность при наличии значительного количества отдельных якорей у одного агрегата включать обмотки по желанию, например последовательно, в целях повышения общего напряжения.

Для автосинхронной (постоянного тока) машины введение промежуточного ротора и выполнение якоря неподвижным созда-

ет возможность выполнения машины бесколлекторной, что весьма затруднительно при вращающемся якоре.

Идентичность выполнения полюсов, расположенных на колесах, для всех разобранных типов машин позволяет осуществить и комбинировать привод — часть промежуточных роторов у одного и того же колеса обеспечивает асинхронный режим, часть — синхронный и, возможно, часть — режим привода постоянного тока. Возможен и промежуточный ротор с пусковой обмоткой, например при расположении в межполюсном пространстве «синхронного» ротора зубцов и короткозамкнутой клетки.

Определенные достоинства в части технологичности изготовления и повышения использования проводниковых материалов имеет конструкция, рассмотренная в [78]. Принципиальные конструктивные схемы показаны на рис. 4.7. На статоре выполнены кольцевые пазы, оси которых совпадают с осью вращения статора, в пазах размещена многофазная обмотка. Обмотка статора может быть укреплена на жестком каркасе и установлена на неподвижных обоймах с зазором относительно внутренней поверхности пазов. Ротор в данной машине может содержать короткозамкнутую обмотку или может представлять собой цилиндр из ферромагнитного материала. Наружный слой ротора может быть выполнен из гистерезисного материала. Можно ротор выполнить явнополюсным, можно каждый ротор снабдить когтеобразной сист-

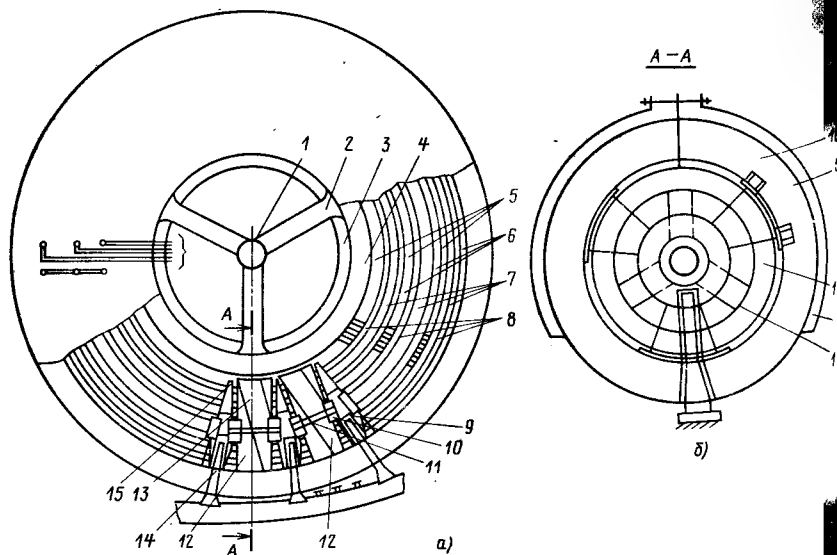


Рис. 4.7. Конструкция МДД:

а — с двумя полукольцами статора; б — разрез кольца статора

мой полюсов и обмоткой возбуждения, ротор может иметь полюса из постоянных магнитов.

Кроме того, электрическую машину можно снабдить датчиком положения ротора и коммутатором, к которому подключить концы обмотки статора, а управлять коммутатором сигналами датчика положения.

Таким образом, машина может выполнять функции любой известной электрической машины:

асинхронной, тогда обмотка статора многофазная, а ротор — в виде относительно короткого толстостенного стакана из ферромагнитного материала по типу «ротора Шенфера» с винтовой нарезкой на наружной поверхности либо в виде ротора с короткозамкнутой клеткой с такой же нарезкой на поверхности ферромагнитной части ротора;

синхронной, например гистерезисной, тогда обмотка статора выполнена также многофазной, а ротор может выполняться в виде внутреннего ферромагнитного стакана, на наружную поверхность которого навита спираль из гистерезисного материала или закреплены полукольца (части кольца) со сдвигом относительно друг друга, образуя на наружной поверхности ротора винтовую нарезку, либо иного ротора синхронной машины с такой же нарезкой;

постоянного тока, например, с двухфункциональной обмоткой на статоре и явнополюсным ферромагнитным ротором с винтовой нарезкой на его наружной поверхности либо с обычной якорной обмоткой на статоре и постоянными магнитами или когтеобразными полюсами на роторе — с винтовой нарезкой на наружной поверхности, чем достигается расширение функциональных возможностей машины.

На рис. 4.7, а изображен общий вид машины со снятой половиной статора (на нижней части условно показаны несколько роторов со стойками, подшипниками и звездочками крепления обмотки при выполнении ее неподвижной); на рис. 4.7, б показан разрез по А—А (условно показаны не попадающие в разрез ступица крепления ферромагнитного стакана ротора и изоляционная звездочка крепления обмотки статора — на стойках ротора).

На основной рабочий вал 1 машины насажена ступица 2, на которой с помощью обечайки 3 укреплен кольцевой (тороидальный) статор 4 с шихтованными зубцами 5 (шихтовка показана на части чертежа) и пазами 6, в которые вложена обмотка 7, на зубцах выполнена винтовая нарезка 8. На стойках 9 установлены подшипники 10, сквозь которые проходит вал 11, на котором закреплен ротор 12, на наружной поверхности которого выполнена винтовая нарезка 13. Стойки 9 установлены на кольцевом или многоугольном основании 14, центрированном относительно оси вала 1. Со стойками 9 жестко связаны звездочки 15,

удерживающие обмотку 7 неподвижно относительно поворачивающихся вокруг оси вала 1 зубцов 5 и спинки статора 16 (в варианте выполнения обмотки 7 неподвижной выводы, проходящие в этом варианте через звездочки 15, на рис. 4.7 не показаны).

Ферромагнитный стакан ротора 12 с наружной винтовой нарезкой 13 укреплен на валу 11 с помощью ступицы 17. В варианте выполнения обмотки 7 вращающейся вместе со статором ее выводы проводятся через отверстия в спинке статора 16 на его наружную поверхность. В этом варианте звездочки 15 на стойках 9 не устанавливаются, а обмотка 7 закрепляется в пазах 6. При подключении обмотки 7 к многофазному, например трехфазному, напряжению токи в ней создадут вращающееся магнитное поле, которое приведет во вращение ротор 12. Взаимодействие винтовых нарезок 8 и 13 приведет к медленному вращению стакана 12 вокруг вала с усилением момента примерно равным $\pi D/h$, где D — рабочий диаметр статора (относительно оси вала 1), а h — шаг винтовой нарезки поверхностей ротора и статора. В такое же число раз снизится частота вращения вала 1 относительно частоты вращения вала 11 ротора 12.

Совершенно аналогично может быть выполнена машина и при других вариантах исполнения. Следует указать, что намотка обмотки 7 на жесткий каркас, связанный со звездочкой, вполне может быть механизирована. Наличие жесткого каркаса из изолированного материала и гарантированные воздушные зазоры между стенками паза и обмоткой 7 может также способствовать выполнению обмотки на повышенное напряжение, облегчать продувку пазов охлаждающим газом и т. п.

Принцип создания в машине редуцированных по скорости движений во взаимно перпендикулярных направлениях нашел свое дальнейшее развитие в [80], где этих направлений три. Фактически это уже МТД — машина тройного движения, позволяющая получить наибольшее возможное редуцирование скорости в одной машине.

У рассматриваемой машины три взаимодействующие части связаны одним магнитным потоком — ротор, статор и внешний магнитопровод перемещаются в трех взаимно перпендикулярных плоскостях; рассматриваемая электрическая машина «гройного движения» использует при создании эффективного безредукторного привода все три пространственные координаты. В качестве базовых моделей могут использоваться все известные типы обычных электрических машин — асинхронные, синхронные, в том числе автосинхронные (постоянного тока).

На рис. 4.8, а изображен схематично общий вид машины (разрез — для варианта поступательного движения ее выходного элемента); на рис. 4.8, б — общий вид (вид сверху) машины без верхней части статора и элементов его крепления на оси.

Электрическая машина содержит роторы 1 и статор, состоящий

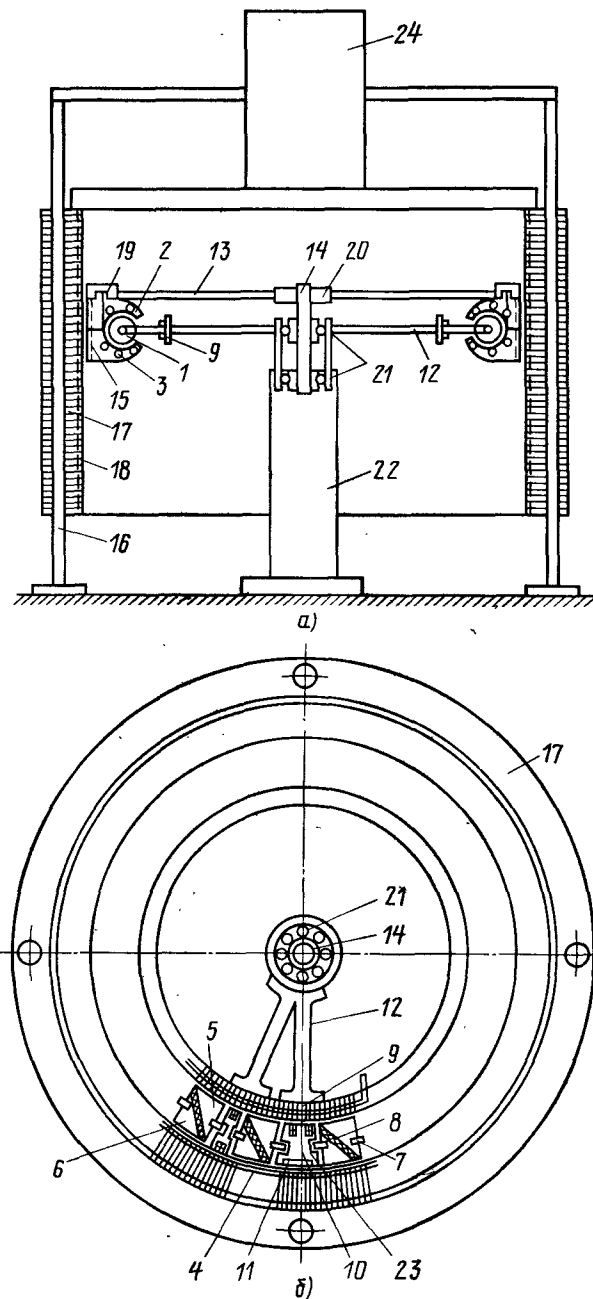


Рис. 4.8. Машина тройного движения:
а — продольный разрез; б — вид сверху

из верхней 2 и нижней 3 кольцевых частей. В кольцевых пазах размещена многофазная обмотка 4, ось которой совпадает с осью вращения статора.

Каждый из роторов 1 состоит из двух полюсных сердечников 5 и 6, сидящих на валу 7. Сердечники 5 и 6 ротора разделены немагнитной прокладкой 8. Между роторами размещены закрепленные на неподвижных стойках 9 магнитопроводы 10 с кольцевой обмоткой 11 возбуждения. Неподвижный вал 7 роторов крепится на спицах 12. Кольцевой статор соединен спицами 13 с валом 14. Наружная поверхность статора выполнена цилиндрической с винтовой нарезкой 15 на ней. Вокруг статора размещен с зазором подвижно сопряженный с направляющими элементами 16 внешний магнитопровод 17, на внутренней поверхности которого выполнена нарезка 18.

Машина работает следующим образом. При подаче напряжения на обмотку 11 возникает магнитный поток, который замыкается по пути: сердечник 10, зазор между левой торцевой поверхностью магнитопровода 10 и торцевой поверхностью сердечника 5 ротора 1, зазор (по дуге поверхности) между сердечником 5 и внутренней поверхностью частей кольцевого статора. При этом он пересекает винтовые нарезки на наружной поверхности полюса и внутренней поверхности пакета статора и, взаимодействуя с токами обмотки 4 кольцевого статора (в случае работы в режиме двигателя), создает при этом момент, приводящий во вращение роторы; аналогично проходит работа в режиме генератора.

При прохождении магнитного потока между ротором и статором вращение ротора 1 вызывает, благодаря наличию винтовой нарезки на обеих поверхностях, вращение кольцевого статора совместно со связанным с ним с помощью крепления 19, спиц 13, соединенных со ступицей 20, насаженной на вал 14, вращающийся в опорно-осевых подшипниках 21, закрепленных в опорной стойке 22. С этой стойкой связаны и спицы 12 неподвижного кольца (или многоугольника), на котором укреплены стойки 9 с подшипниками 23 для валов 7 роторов 1. Угловая скорость этого вращения ниже угловой скорости в отношении $h_1/\pi D_{к.с.}$, где h_1 — шаг нарезки; $D_{к.с.}$ — диаметр кольцевого статора, а момент соответственно больше.

При прохождении магнитного потока из наружной цилиндрической поверхности нижней 3 (внешней) части кольцевого статора во внутреннюю поверхность магнитопровода 17 благодаря наличию на этих поверхностях винтовой нарезки с шагом h_2 (совершенно необязательно выполнять $h_2 = h_1$) возникает усилие, заставляющее магнитопровод 17 вместе с рабочим штоком 24 с еще меньшей скоростью перемещаться в плоскости, перпендикулярной как плоскости вращения кольцевого статора, так и плоскости вращения ротора. Передаточное число и здесь равно

отношению $h_2/\pi D_{н.к.}$, где $D_{н.к.}$ — диаметр наружного кольца внешнего магнитопровода.

Таким образом, достигается весьма значительное увеличение общего передаточного числа. Если на участке ротор — кольцевой статор это число составляет, например, 100—150, то не меньшее значение можно получить и на участке кольцевой статор — внешний магнитопровод, доведя общее передаточное число до десятков тысяч.

Выходной элемент может, конечно, быть выполнен аналогично системе ротор — кольцевой статор и для вращательного движения. При этом магнитопровод 17 выполняется не в виде прямого отрезка трубы, а в виде трубы, согнутой в кольцо. Внутри магнитопровода размещаются несколько статоров, крепление которых проходит через разрез в кольцевой трубе, как это выполняется в элементе («модуле») ротор 1 — кольцевой статор 2. При вращении ротора с частотой 3000 об/мин и выше можно создать безредукторный привод, рабочий вал которого вращается с частотой в малые доли оборота в минуту.

Машины двойного движения показаны на фотографии рис. 4.5 и рис. 4.7, выполнены в двух основных вариантах.

1. Внутри статора, имеющего возможность только поступательного движения, размещен (выступающий за пакет статора на длину требуемого перемещения) ротор, имеющий возможность только вращательного движения. Линейная скорость перемещения статора при этом будет $V = nh$, где n — частота вращения ротора, а h — шаг винтовой нарезки на поверхностях ротора и статора. Предпочтительней при этом иметь питаемые от сети обмотки на статоре и ротор без колец, например, при использовании в качестве базовой машины асинхронного двигателя. Предполагаемые области применения — относительно короткоходовые тихоходные приводы с поступательным движением.

2. К ободу колеса большого диаметра прикреплен тороид с кольцевым сечением, внутри которого размещаются короткие роторы; их оси расположены по направлению касательных к окружности колеса. На внешней поверхности роторов и внутренней кольцевой поверхности тороида нанесена винтовая нарезка. В пазах внутренней кольцевой поверхности тороида размещена обмотка: многофазная — при выполнении машины типа многофазной асинхронной или синхронной либо якорная постоянного тока. В последнем случае требуется коммутация секций этой обмотки в функции положения ротора. Выполнение роторов также зависит от типа машины: короткозамкнутый ротор Шенфера или фазный ротор с кольцами — для асинхронного выполнения; ротор с постоянными магнитами, с электромагнитным возбуждением неявнополюсный или явнополюсный, в том числе бесконтактный — для синхронных или автосинхронных машин. Вращение колеса (выходной оси привода) и вращение роторов происходит во вза-

имно перпендикулярных плоскостях, аналогично паре червяк — червячное колесо. Линейная скорость на упомянутых поверхностях, как и выше, $V = nh$; частота вращения статора

$$n_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{v}{\pi D_c} = \frac{n_p h}{\pi D_c}; \quad \frac{M_c}{M_p} \approx \frac{n_p}{n_c} = \frac{\pi D_c}{h}.$$

Так, при $n_p = 3000$ об/мин и $n_c = 12,5$ об/мин имеем $M_c/M_p = 240$.

Проведенный анализ вопросов достаточной «упругости» такой передачи момента приводит еще к желательному отношению $h/\delta \geq 16$ (аналогично анализу соотношения у гребенчатой системы в гл. 3).

Исследование основной формулы

$$F = \frac{1}{2} (AW)_\delta \frac{d\Phi(h)}{dh} \quad (4.1)$$

позволило вывести относительно простые приближенные формулы для предварительной оценки параметров привода при заданных n и M на выходной оси (или соответственно F и v на выходном штоке). Для оценки электрических нагрузок и определения соответствующих размеров паза имеем

$$F' = \frac{F}{S_\delta} = 0,7 (AW)_\delta^2 \frac{\mu_0}{\delta h}, \quad (4.2)$$

а для оценки магнитных нагрузок

$$F' = 56 \cdot 10^4 \frac{\delta}{h} (B_\delta)^2 \quad (4.2a)$$

при $h/\delta = 20$ и $B_\delta = 0,96$ Тл (ограничивается индукцией в зубце и отношением ширины зубца к зубцовому делению) имеем $F' = 2,5 \cdot 10^4$ Н/м². Приводимые в конце этого параграфа данные относятся к $F' = (1,6 \div 2,5) \cdot 10^4$ Н/м².

Представляет определенный интерес и решение задачи выполнения у шихтованных пакетов спиральной нарезки без трудно выполнимой механической обработки. Для этой цели автором было предложено штамповать листы таких пакетов с пропуском определенного количества зубцов и верной сборкой со сдвигом на один зуб. Так в реально выполненном в заводских условиях экспериментальном образце (см. рис. 4.5) при пропуске 12 зубцов и оставлении последующих 12 зубцов на каждом листе электротехнической стали толщиной 0,5 мм при верной сборке получена винтовая нарезка с выступом шириной 6 мм и впадиной 6 мм при шаге винта $h = 0,012$ м*. При частоте вращения ротора

* На другом заводе был проработан иной вариант выполнения нарезки на уже собранном «полнозубом» пакете: статор залит легкоплавким составом, в полученном «моноклите» выполнена нарезка, потом этот сплав выплавляется и затем проводится намотка статора.

23,3 об/с (1400 об/мин) была соответственно получена линейная скорость перемещения статора $v = 23,3 \cdot 0,012 = 0,28$ м/с. Экспериментальное исследование проведено на образце (см. рис. 4.5), у которого статор набран из стандартного пакета четырехполюсного асинхронного двигателя с диаметром расточки 84 мм, длиной 82 мм. Машина имеет зазор $\delta = 0,25$ мм; $z = 24$ зубца со срезами по дуге 180° двенадцатью зубцами. Это позволило в соответствии с изложенным выше получить на статоре винтовую нарезку с $h = 0,012$ м. Другие данные машины: $w = 320$ витков; провод ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм; ротор — цилиндрическое стальное кольцо, на внешней поверхности которого выполнена прямоугольная винтовая нарезка с шагом $h = 0,012$ м; $K_\delta = 1,2$; $\delta' = 0,3$ мм; $h/\delta = 40$; $m_c = 12,5$ кг; $S_p = 240$ см²; ход 118 мм.

Для осциллографирования движения статора с ним был связан движок потенциометра, укрепленного на неподвижном основании. Результаты обработки осциллограмм дали средние значения: линейная скорость движения статора $v = 0,29$ м/с; $n_p = 1450$ об/мин. Переход от нулевой скорости к $v = 0,29$ м/с происходит примерно за $5,5 \cdot 10^{-3}$ с, т. е. среднее ускорение $a_p = 52,5$ м/с² (в дальнейшем принимаем $a = 50$ м/с²); $F = 735$ Н; $P = 213$ Вт; величина $m' = \frac{12,5}{0,213} = 58,5$ кг/кВт, в

5—7 раз меньше, чем у принятого для сравнения линейного асинхронного двигателя НЭТИ, который при близкой массе $m = 9,8$ кг развивает при скорости $v = 0,28$ м/с всего лишь 36 Вт, да и то при ПВ=25%. Весьма характерна полученная величина $F' = \frac{735 \text{ Н}}{240 \text{ см}^2} \approx 3$ Н/см², что превышает принятую нами в

расчетах величину $F' = 2,5$ Н/см²; это, по-видимому, объясняется тем, что расчеты велись для $h/\delta = 20$, а в реально выполненном пакете $h/\delta = 40$, что должно было повысить величину F' .

Здесь возникают новые возможности обеспечения линейного неограниченного движения, подробно рассмотренного в гл. 3, но практически без значительной доли недостатков, структурно при- сущих применяемым обычно для этой цели линейным двигателям. Действительно, если рассматривать рис. 4.3, а не как «вырыв» для пояснения работы машины двойного движения, а как реальное выполнение статора МДД в виде лотка неограниченной длины, то это соответствовало бы линейному электроприводу постоянного тока. Выполнение при этом обмотки якоря 8 (и соответственно щеточной системы 6) по типу двухфункциональной обмотки, подробно рассмотренной в гл. 3, и позволило бы обеспечить возбуждение полюсов 10 без использования отдельных обмоток 12, а введение разрезов вдоль лотка — уменьшить рассеяние потока возбуждения. Якоря тяговых электродвигателей, размещенные спереди и (или) сзади экипажа, вращающиеся в радиально-опорных подшипниках 15, обеспечивали бы при этом

поступательное движение экипажа вдоль лотка, укрепленного на пути. Располагая лоток, например, на эстакаде, над якорем, можно при этом совместить тягу с электромагнитной подвеской; под якорем — создавать дополнительное давление на рельсы, например, для комбинированной тяги, описанной в гл. 3. Наконец, если требуется поступательное движение экипажа в трубе, внутренней поверхности ферромагнитной трубы снабжается многополюсной системой с нарезкой соответственно указанному выше. Аналогично может быть «спрямлена» МДД любого вида — асинхронная, синхронная и т. п.; подробнее это описывается в конце настоящей главы, при рассмотрении линейного электропривода на базе «развертывания в линию» описанных выше МДД с промежуточными роторами, по-видимому, наиболее интересных во многих практических случаях, а также при рассмотрении электро-механических преобразователей движения.

Возможные применения электромагнитного винтового сцепления для построения линейного электропривода при использовании обычных электродвигателей рассмотрены ниже — такие решения, добавляющие лишь внешние элементы к отработанной и высокотехнологичной конструкции электрических машин, представляют значительный практический интерес.

Если выполнение машины двойного движения в соответствии с рис. 4.5 практически не вызывает заметных технологических трудностей, и МДД такого типа могут изготавливаться на обычных электромашиностроительных предприятиях, в том числе ремонтных, то изготовление МДД типа, показанного на рис. 4.7 [85], требует значительной технологической культуры, высококвалифицированной конструкторской проработки для каждого конкретного типа, габаритного размера, условий применения. Основные трудности здесь, особенно при создании асинхронных МДД, в обеспечении не слишком большого зазора, в его поддержании в процессе работы, так как требуется высокая точность соосности больших окружностей; небольшие разрезы в тороидальном магнитопроводе затруднят установку достаточно устойчивых стоек для подшипников роторов.

В частном случае, когда требуется лишь поворот на угол $\alpha < 2\pi$, можно иметь разрез у магнитопровода статора лишь на угле $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ определяется шириной выступа, стопорящего вращение системы роторов. Так, для широко распространенного, выпускаемого в сотнях тысяч штук в год в нашей стране привода задвижек типа МЭО (механизм электрической однооборотный) $\alpha = 90^\circ$ и при дуге, занимаемой выступами, $\Delta\alpha = 30^\circ$ имеем разрез лишь на $\alpha' = 120^\circ$, т. е. 2/3 тороидального статора имеют полностью замкнутый магнитопровод.

4.2. ЭЛЕМЕНТЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ

По конструктивному исполнению машина двойного движения представляет собой совмещенную электрическую машину: обмотки ротора и статора взаимодействуют между собой почти так же, как и в обычной вращающейся базовой машине (асинхронной, синхронной, автосинхронной), а выступы нарезок статора и ротора (системы роторов) — как синхронная муфта или гребенчатая электромагнитная система, рассмотренная в гл. 3.

Анализ традиционных электромагнитных взаимодействий в первой части лишь немного отличается от обычного (в качестве примера в конце данного параграфа приведены расчеты асинхронных МДД с короткозамкнутым ротором и ротором Шенфера). Аналогично вводятся небольшие изменения и в расчеты МДД других типов. Анализ взаимодействия выступов нарезок ротора и статора проводим аналогично рассмотренному в гл. 3.

В этой книге продолжается проводимая автором уже примерно полвека, с 30-х годов, линия на создание новых электрических машин на основе совмещения в одной машине функций, традиционно присущих разным машинам. Так, автором в содружестве с А. Г. Иосифьяном были предложены в 1938 г. бесконтактные сельсины ВЭИ, в которых совмещены функции трансформатора и синхронной машины; так появился совмещенный сельсин-двигатель, мотосин [73]; двигатель, управляемый поворотом всего статора или его части, — ДУПС; автосинхронный линейный двигатель с двухфункциональной обмоткой, секции которой попеременно выполняют функции обмотки якоря и возбуждения; была издана в соавторстве с И. П. Копыловым, Ю. М. Келимом, Л. Х. Шидловцем монография «Совмещенные электрические машины для автоматики» [40].

Представляется, что использование уравнений Максвелла, в частности записанных в виде законов электромагнитной индукции и полного тока $\oint E dl = - d\Phi/dt$ и $\oint H dl = \sum i$, позволяющих где угодно (где удобно!) размещать токонесущие и потоконосущие элементы, лишь бы они были охвачены общим замкнутым контуром, обеспечивает основу для создания самых разнообразных типов электрических машин. Разбираемые совмещенные машины — лишь отдельные, более (или менее) удачные примеры таких решений. Используется здесь и уравнение удельного значения силового взаимодействия поверхностей статора и ротора (системы роторов), определяемое из решения уравнений (3.22), (3.23). При подходящих для рассматриваемых конструкций взаимоотношениях основных размеров можно для определения производной магнитной проводимости по перемещению воспользоваться кривыми изменения проводимости в зависимости от взаимного смещения выступов, приведенными на рис. 3.27.

Имеем в соответствии с кривыми, где h — текущее значение смещения вдоль нарезки с шагом h_n ,

$$\Phi(h) = \frac{\Phi_{\max} + \Phi_{\min}}{2} + \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2} \cos 2\pi \frac{h}{h_n}. \quad (4.3)$$

Тогда

$$\frac{d\Phi(h)}{dh} = -(\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \frac{\pi}{h_n} \sin \frac{2\pi h}{h_n}; \quad (4.4)$$

$$\left| \frac{d\Phi(h)}{dh} \right|_{\max} = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \frac{\pi}{h_n}; \quad (4.5)$$

$$\Phi_{\max} = (AW)_{\delta} G_{\delta \max}, \quad (4.6)$$

$$\Phi_{\min} = (AW)_{\delta} G_{\delta \min}, \quad (4.7)$$

где $G_{\delta \max}$ — проводимость для всего потока при расположении выступа над выступом; $G_{\delta \min}$ — то же при расположении выступа над впадиной. При $\frac{h_n}{\delta} = 20$ имеем $G_{\delta \min} \approx 0,4 G_{\delta \max}$; уточненные исследования дают при этом

$$G_{\max} = \frac{\mu_0 0,75 S_{\delta \max}}{\delta_{\min}}. \quad (4.8)$$

При других отношениях h/δ в интервале $15 \leq h/\delta \leq 60$ будем считать, что

$$\frac{G_{\delta \min}}{G_{\delta \max}} = 0,4 \frac{20}{h/\delta} = \frac{8}{h/\delta} = \frac{\Phi_{\min}}{\Phi_{\max}}. \quad (4.9)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \left| \frac{d\Phi(h)}{dh} \right|_{\max} &= \Phi_{\max} \left(1 - \frac{8}{h/\delta} \right) \frac{\pi}{h_n} = \frac{\pi}{h_n} \left(1 - \frac{8\delta}{h_n} \right) (AW)_{\delta} G_{\delta \max} = \\ &= (AW)_{\delta} \frac{\mu_0 0,75 S_{\delta \max}}{\delta_{\min}} \frac{\pi}{h_n} \left(1 - \frac{8\delta}{h_n} \right). \end{aligned}$$

Усилие

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} (AW)_{\delta} \frac{d\Phi(h)}{dh}; \\ F_{\max} &= 0,75 (AW)_{\delta}^2 \mu_0 S_{\delta \max} \frac{\pi}{h_n} \left(\frac{1}{2\delta} - \frac{4}{h_n} \right). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Поскольку $S_{\delta \max} = \pi d l a_i$ (при неявно выраженных полюсах $\alpha_i = 1$),

$$F' = \frac{F}{S_{\delta \max}} = 0,75 (AW)_{\delta}^2 \mu_0 \frac{\pi}{h_n} \left(\frac{1}{2\delta} - \frac{4}{h_n} \right). \quad (4.11)$$

Учитывая, что $B_{\delta} \delta / \mu_0$, имеем

$$F' = 0,75 B_{\delta}^2 \frac{\pi}{\mu_0} \frac{\delta}{h_n} \left(\frac{1}{2} - 4 \frac{\delta}{h_n} \right). \quad (4.12)$$

При заданном B_{δ} и выбранных пределах h/δ выгоднее выполнять $h/\delta = 16$ (из анализа экстремума $F = f(\delta/h)$).

Упомянутая выше эквивалентная площадь сцепления (максимальная)

$$S_{\delta \max} = l_a N \cdot 0,9 \pi d \cdot 0,8, \quad (4.13)$$

где N — число роторов «модулей» с активной длиной l_a у каждого ротора с диаметром d . Коэффициент 0,9 учитывает разрез в тороиде для введения стопорных выступов, входящих в радиальные пазы стоек с валиками, вокруг которых вращаются на укрепленных внутри их цилиндров подшипниках роторы, а коэффициент 0,8 вместо 0,75, ранее принятым в (4.8), учитывает наличие стadiны.

Если учесть, что $l_a N \approx 0,8 \pi D$, где D — средний диаметр тороида, внутри которого размещаются роторы, то окончательно

$$S_{\delta} = 0,575 \pi^2 D d. \quad (4.14)$$

Если задан момент на выходной оси M , то габаритные размеры могут быть вычислены по выражению

$$D^2 d = \frac{M}{2,83 F'}. \quad (4.15)$$

Если задана мощность P_2 , формула (4.15) принимает вид

$$D^2 d = \frac{10}{3 F'} \frac{P_2}{n}, \quad (4.16)$$

где n — частота вращения. Выбирая по формулам, приведенным выше: δ — из конструктивных соображений (с учетом высоты стрелки, возникающей из-за прямолинейности образующей цилиндра ротора и дугообразности линии статора внутри тороидального пространства, где расположены роторы) и h_n/δ — получаем значение F' для выбираемых B_{δ} .

Исходя из соотношения d/D (например, $d/D = 0,05 \div 0,15$, где меньшие величины принимаются для больших значений D) выбираем диаметры D и d ; по требуемой выходной частоте вращения n и D определяем линейную скорость на окружности: $v = \pi D n / 60$; задаваясь частотой вращения ротора n_p , об/с, (например, для асинхронной МДД при числе полюсов $2p = 4$ $n_p = 23 \div 24$ об/с) определяем шаг нарезки

$$h_n = \frac{v}{n_p K}, \quad (4.17)$$

где K — коэффициент многозаходности нарезки. Глубину нарезки a определяем из выражения

$$a \approx (0,2 \div 0,3) h_n. \quad (4.18)$$

Исходя из выбранных B_{δ} и $2p$ определяем предварительно высоту спинки $h_{\text{сп}}$.

Существенный интерес при общем анализе представляет рассмотрение принципиального вопроса о сравнительных массогабаритных показателях машин, аналогичных по основной выполняемой функции: МДД вращающегося типа и двигатель с червяч-

ным мотор-редуктором; МДД поступательного типа и обычный двигатель с винтовым редуктором.

Основными критериями для сравнительной оценки электромагнитного и механического сцеплений являются реализуемое удельное усилие на площади взаимодействия и доля полезной используемой площади взаимодействия в общих габаритных размерах устройства. Для МДД предельное значение усилия, передаваемое с каждого квадратного метра площади взаимодействия, равно $F'_{\text{см}} = 9 \cdot 10^3 \pi B_\delta^2$ и при $B_\delta \approx 0,9$ Тл $F'_{\text{см}} \approx 2,5 \cdot 10^4$ Н/м².

Наибольший по типуажу на 1981—1985 гг. редуктор Ч-160 [95] имеет максимальное передаточное число $i = 80$, тогда как у МДД $i = \pi D_{\text{ср}}/h$ и, например, при $h = 31,4$ мм (что при $\delta_{\text{ср}} = 2,0$ мм соответствует оптимальному соотношению $h/\delta = 16$) и $D = 2$ м имеем $i = 200$. Этому передаточному числу соответствует двухступенчатый редуктор, например Ч2-160, состоящий из двух одноступенчатых: Ч-80 (быстроходная ступень) и Ч-160 (тихоходная ступень); $\eta = 0,66$; масса редуктора $m = 170$ кг; при $n = 1500$ об/мин и $i = 200$ имеем $n_{\text{вых}} = 7,5$ об/мин; $\omega = 0,8$ 1/с; $M = 2,77$ кН·м и $P = 2,2$ кВт.

Таким образом, у редуктора

$$m' = \frac{m}{P} = \frac{170}{2,2} \approx 77 \text{ кг/кВт.}$$

Удельная масса для червячных мотор-редукторов примерно 300 кг/кН·м при $\omega = 1$ /с. У МДД это значение в несколько раз меньше.

В рассмотренном редукторе теряется треть всей мощности ($\eta = 0,66$), а в МДД при электромагнитном сцеплении редуцирование скорости оплачивается лишь некоторым увеличением намагничивающего тока, дополнительные потери здесь не превышают нескольких процентов мощности. При использовании постоянных магнитов остаются лишь незначительные потери в массивных частях, пересекаемых переменным потоком.

Небольшое значение удельного усилия взаимодействия винтовых нарезок ротора и статора МДД («усилие сцепления») существенно влияет на его массогабаритные показатели. Действительно, в соответствии с (4.9) имеем $F'_{\text{сц}} = 9 \cdot 10^3 \pi B_\delta^2$ и лишь при высоком значении $B_\delta \approx 1,03$ Тл имеем $F'_{\text{сц}} = 3 \cdot 10^4$ Н/м², что характерно, например, для удельного усилия у машины постоянного тока (подробнее см. ниже). Для небольших асинхронных машин это значение меньше, но и там на поверхности ротора $F'_p \geq 1 \cdot 10^4$ Н/м². Таким образом, даже при этом малом значении F'_p имеем при одинаковой площади зазора $S = \pi D l$ для указанных удельных усилий предельную мощность на роторе $P_p = 10^4$ Sv и на сцеплении $P_{\text{сц}} = 3 \cdot 10^4$ Sv $= 3 \cdot 10^4$ Sv/ i . Уже при $i > 3$ (для выбранных параметров) необходимо для передачи всей базовой мощности увеличить значение S , с которым жестко связаны массогабаритные

параметры всей машины. Эти параметры будут определять мощность сцепления — выигрыш от применения МДД не велик, в сравнении, например, с цилиндрическим вариантом ЛДПТ, которого при зазорах в несколько миллиметров можно достичь значения $F' \geq 3 \cdot 10^4$ Н/м², такого выигрыша в массогабаритных размерах вообще нет. В общем виде отношение предельных мощностей сцепления и базовой машины постоянного тока имеет вид

$$\frac{P_{\text{сц}}}{P_{\text{эм}}} = \frac{9 \cdot 10^3 \pi B_\delta^2 v_p}{\alpha_i B_\delta A v_p i} = \frac{9 \cdot 10^3 \pi B_\delta}{\alpha_i i A}. \quad (4.19)$$

При $\alpha_i = 0,7$ имеем $P_{\text{сц}}/P_{\text{эм}} = \frac{4,4 \cdot 10^4 B_\delta}{i A} \geq 1$; для сохранения массогабаритных показателей базовой машины должно выполняться отношение $i \leq 4,4 \cdot 10^4 \frac{B_\delta}{A}$. При $A = 4,4 \cdot 10^4$ А/м имеем $i \leq B_\delta$,

а при выбранном значении α_i имеем для $F' = 3 \cdot 10^4$ Н/м² значение индукции $B_\delta = F' / (\alpha_i A) = 3 \cdot 10^4 / (0,7 \cdot 4,4 \cdot 10^4) \approx 1$ Тл.

Достижение выходной мощности, равной базовой, для $i > 1$ возможно лишь при соответствующем увеличении $S_{\text{сц}}$, т. е. площади зазора, и увеличении в i раз массогабаритных показателей машины. Целесообразно, таким образом, увеличить и в базовой машине отношение B_δ/A ; но, если сохранить значение $F'_{\text{см}}$, например, при $B_\delta = 2$ Тл и $A = 2,2 \cdot 10^4$ А/м, можно получить для $i = 4$ соответствующее улучшение массогабаритных показателей. При обычно требуемых $i > 4$ массогабаритные показатели базовой машины будут ухудшены в отношении $i/4$. Но и значение $B_\delta = 2$ Тл практически реализуемо лишь в беспазовой машине — для машины с пазами и зубцами такая индукция существенно перенасытит зубцы якоря. Радикальным выходом из положения могло бы стать создание конструкции без стального магнитопровода со сверхпроводящими витками, создающими винтовое поле токосцеплений статора и ротора, где возможны значения $B_\delta \geq (3 \div 5)$ Тл, что соответствовало бы сохранению номинального значения базовой машины до $i = 25$. Однако столь существенное изменение конструкции заставляет корректировать и само понятие «базовой машины». При существующих же обычных конструкциях основной выигрыш МДД заключается в существенно более высоких энергетических показателях. У ЛДПТ для достижения аналогичных показателей приходится в соответствии с § 1.3 существенно снижать плотность тока, что ведет к резкому увеличению массы меди в машине.

Если же учесть, что МДД одновременно выполняет функции предельного момента, а также учесть «нестираемость» ее сцепляющихся поверхностей, относительную бесшумность их взаимодействия, выносливость по отношению к ударной нагрузке и преимущества МДД представляются достаточно существенными.

ными. Кроме того, становится понятным ограниченность применения так называемых бесконтактных магнитных червячных передач, у которых $S_{сн}$ существенно меньше, чем у МДД.

Действительно, изложенное, например, в [16] описание таких передач, имеющиеся патенты и авторские свидетельства (например, [82]) подтверждают, что съем момента с единицы произведения Dd у них в десятки раз меньше, чем у механической передачи. Но и эти системы в последние годы существенно усовершенствованы. Рассмотрим одно из предложений в этой области [82], направленное на повышение надежности и улучшение параметров такого устройства путем некоторого уменьшения объема активных материалов (обычно проводниковой меди) и снижения высокого уровня рассеяния магнитного потока, вызванного обычным размещением системы возбуждения на червячном колесе.

Поставленная цель достигается размещением системы возбуждения concentрично оси червяка. Система возбуждения может быть выполнена в виде неподвижно укрепленной катушки, установленной с зазором относительно внутренней поверхности червяка и полюсов.

На рис. 4.9 показан вариант выполнения передачи. Передача содержит постоянный магнит 1, выступы 2 винтовой нарезки полюсов червяка, выступы 3 винтовой нарезки полюсов червячного колеса, ступицу 4 червячного колеса, ось 5 червячного колеса, катушку 6 возбуждения, concentричную оси червяка и не соприкасающуюся с ним, ось 7 червяка, крепление 8 катушки 6 к неподвижному основанию машины 9, фиксатор 10.

Устройство работает следующим образом. Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом 1 и (или) током в катушке 6, замыкается по радиусу червяка по пути: полюс магнита 1, выступы 2 винтовой нарезки ферромагнитного полюса червяка, зазор, выступы 3 винтовой нарезки ферромагнитных полюсов червячного колеса по полюсу вдоль линии, параллельной оси 7 червяка, зазор, выступы 2 винтовой нарезки ферромагнитного полюса червяка, выступы 3.

При создании этого потока только током, протекающим в катушке 6, вместо постоянного магнита должно быть предусмотрено ферромагнитное замыкающее ярмо, на рис. 4.10 не показанное. Магнитный поток стремится удерживать выступы червячного колеса и червяка в положении наибольшего перекрытия с силой, пропорциональной производной потока по соответствующему перемещению. Если поворачивать червяк, то имеющее возможность поворачиваться лишь вокруг оси 5 червячное колесо будет вращаться в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения червяка, совершая за один оборот червяка перемещение на один шаг нарезки, выполненный на поверхности червяка и червячного колеса.

Рабочее смещение осей выступов червяка и червячного колеса

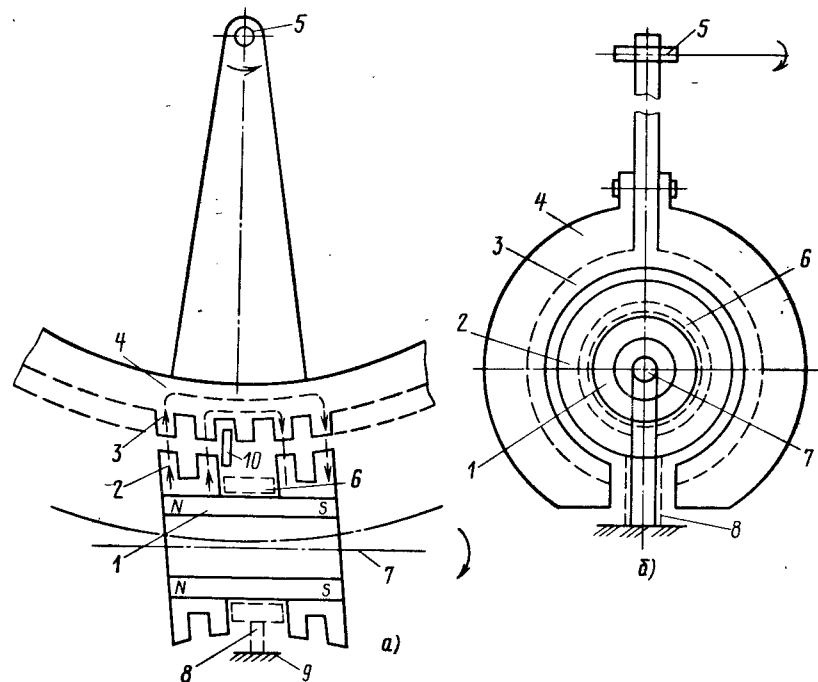


Рис. 4.9. Магнитная червячная передача:
а — разрез по оси червяка; б — разрез по радиусу

друг от друга определяется соотношением между упругостью магнитного сцепления и противодействием нагрузки, связанной с червячным колесом. Для защиты от недопустимых смещений выступов червяка и червячного колеса относительно друг друга на червяке могут быть также установлены несколько дуговых неферромагнитных выступов-зубьев (фиксатор 10), входящих со значительным зазором в кольцевое пространство между выступами червячного колеса. При нормальной работе эти зубья не соприкасаются с червячным колесом, но при толчках нагрузки или от иных причин, вызывающих резкое увеличение смещения выступов червяка относительно червячного колеса, зубья не допускают срыва синхронизации между движением червяка и червячного колеса.

Преобразователи движения составляют основу современного машиностроения. К ним относятся:

преобразователи вида движения, например возвратно-поступательного движения поршней двигателей внутреннего сгорания в однонаправленное вращательное движение ведущих колес автомашины; преобразователи скорости и направления этого вращения — «коробка скоростей»;

устройства для обратного преобразования — вращения вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение станка-качалки на нефтепромыслах или насосов, пульсаторов в химическом оборудовании и других отраслях народного хозяйства, строгальных и аналогичных станках в станкостроении;

преобразователи вращения вала тягового двигателя в поступательное движение поезда или приводного двигателя в перевод стрелки на железнодорожном транспорте, причем не только сцеплением колесо — рельс у поезда или шестерня — рейка у стрелочного перевода, но и по современным проектам также с применением линейных двигателей;

широчайший класс преобразователей скорости и направления движения — редукторы, системы изменения скорости и реверса в большом диапазоне мощностей — от приводов рабочих элементов роботов, а также всевозможных задвижек, вентилях с приводными двигателями мощностью в несколько ватт до прокатных станов с приводными двигателями мощностью порядка 10 000 кВт. Исключительное значение при этом имеют не только вопросы материалоемкости и трудоемкости преобразователей движения, но и их качественные показатели, такие, как быстрота действия, надежность, удобство в эксплуатации. Так, например, время реверса главного привода реверсивных прокатных станов решающим образом влияет на их производительность; постоянные времени элементов в системах регулирования технологических процессов определяют собой качество регулирования и в большой степени производительность этих процессов. То же относится и к приводным устройствам роботов и манипуляторов. Конечно, в современном машиностроении совершенствованию преобразователей движения уделяется большое внимание, но, чтобы сделать рывок в машиностроении, представляется интересным рассмотреть и некоторые нетрадиционные пути создания всего класса преобразователей движения. Одним из таких нетрадиционных решений является излагаемая ниже система преобразователей движения, использующая в основном неконтактное сцепление поверхностей, снабженных винтовыми нарезами и отличающихся разными направлениями нарезок и их шагом.

Преобразование вида движения, а также осуществление реверса или изменение скорости создаются переключениями в электрической цепи и обеспечиваются при этом воздействием только на элементы преобразователя без изменения скорости или реверса приводного двигателя и других устройств вне преобразователя. Как будет показано, этим путем удастся во много раз снизить время реверса, уменьшить постоянные времени регулирования. При этом в отличие от проектов, требующих создания новых двигателей (например, линейных, моментных и т. п.), используются обычные, в том числе и наиболее экономичные, скоростные двигатели.

Приведем такой вариант преобразователя для объектов, где в последнее время усиленно прорабатываются решения с линейными двигателями.

Принципиальная схема бесконтактного преобразователя вращения в неограниченное поступательное движение, развивающего принцип, изложенный в [82], показана на рис. 4.10. У размещенного в объекте 1 (клеть, лифт, вагонетка, вагон метро) двигателя 2 на валу 3, вращающемся в подшипниках 4 и 7, закреплен магнитопровод 10 с кольцеобразными полюсными наконечниками 5 и 11, на наружной поверхности которых выполнены спиральные нарезки 6 и соответственно 12. В трубе 13 укреплены ферромагнитные замыкатели потока 14 с нарезками 15, взаимодействующими с нарезками 6 и 12 на полюсных наконечниках 5 и 11. В ферромагнитных замыкателях 14 сделаны прорезы 16, в которые входят направляющие 9, с помощью которых объект 1 может поступательно перемещаться внутри трубы 13. На направляющих, кроме того, с помощью опор 19 и накладок 20 укреплены катушка возбуждения 8 потока преобразователя движения, перемещающаяся вдоль трубы вместе с объектом 1, но не вращающаяся. Подвод тока как к катушке 8 (проводниками 18), так и к двигателю 2 осуществляется с помощью контактных щеток или роликов 17, скользящих вдоль установленных замыкателей потока контактных полос 18 (показано на рис. 4.10 только на схематичном разрезе по А — А) аналогично, например, системе питания поездов метро. Магнитный поток, создаваемый катушкой возбуждения 8, замыкается по пути: магнитопровод 10, полюсный наконечник, например 5, выступы его нарезки 6, выступы нарезки замыкателей потока 15 вдоль замыкателей потока 14 (если шихтованных — то вдоль движения), снова выступы на-

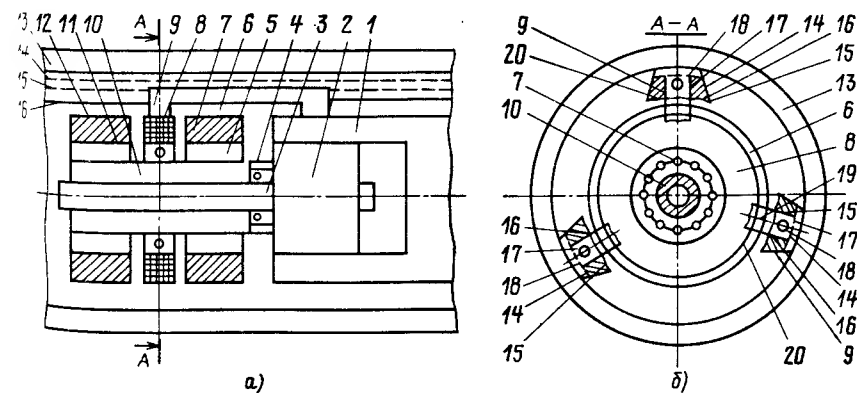


рис. 4.10. Преобразователь вращательного движения в неограниченное поступательное:

а — схематичный продольный разрез; б — разрез по линии А — А

резки 15, зазор, выступы нарезки 12, магнитопровод 10. Он вызывает при вращении полюсных наконечников 5 и 11 неограниченное поступательное перемещение объекта 1 вдоль трубы 13. Показанное на рис. 4.10 несимметричное расположение замыкателей потока позволяет осуществить и левитацию — полную или частичную компенсацию веса объекта на рис. 4.11. Для обеспечения перемещения экипажа 6 вне трубы, например вдоль рельсового пути, применен один замыкатель потока 5, с которым взаимодействуют полюсные наконечники 1, вращаемые валом 7 в подшипниках 2; на этом рисунке кроме катушки возбуждения 3 изображен и вариант с постоянным магнитом.

Покажем, что при питании катушки возбуждения постоянным током с неизменной величиной МДС $F_k = s_k K_i \Delta$, где s_k — поперечное сечение окна катушки; K_i — коэффициент заполнения катушки проводниковым материалом и i — плотность тока в катушке, доля МДС, приходящаяся на зазор, резко возрастает по мере смещения выступов относительно друг друга. Сложный характер зависимости проводимости зазора от взаимного смещения выступов и стальной части магнитной цепи от величины индукции в ней затрудняет аналитический вывод зависимости распределения МДС между частями магнитной цепи от указанного смещения выступов. Определенное упрощение анализа внесла примененная автором аппроксимация соответствующих кривых. Так, например, кривая зависимости проводимости зазора в функции относительного смещения выступов $\xi = h/h_n$ при отношении шага нарезки h_n к минимальному зазору $h_n/\delta = 20$ может быть удовлетворительно аппроксимирована косинусоидой $G(\xi) = 0,7 + 0,3 \cos 2\pi\xi$ с погрешностью не более 8%, а зависимость напряженности поля в литой стали $H_{ст}$ от индукции в ней $B_{ст}$ в диапазоне индукций $B_{ст} = (1 \div 2,05)$ Тл функцией $H_{ст} = H_1 e^{3,8(B_{ст}-1)}$, где H_1 — напряженность поля при индукции $B_{ст} = 1$ Тл; отклонения от табличных данных при этом не пре-

вышают 4%. Пусть при полном перекрытии имеем индукцию в стали $B_{ст} = 2$ Тл, что при ширине выступа h_n , равной половине шага нарезки h_n , соответствует средней индукции в зазоре $B_k = 1$ Тл. Примем, что имеющая при этом место наибольшая проводимость зазора соответствует приведенному зазору $\delta = 1,5$ мм (если воспользоваться известным соотношением для эквивалентного зазора $\delta' = \delta_{\min} \frac{h_n + 10\delta}{h_n - 10\delta} = 1,5$ мм, то это значение соответствует $\delta_{\min} = 1$ мм при $h_n = 20\delta$ и $h_n = h_n/2$). Тогда при полном перекрытии имеем $F_k = 6200$ А при эквивалентной длине стальной части магнитной цепи $L_{ст} = 0,2$ м.

Рассмотрим рабочий режим при $\xi = h/h_n = 0,4$ (перекрытие выступов равно 0,2). Тогда по аппроксимативной формуле проводимость зазора составит 0,457 от проводимости при полном перекрытии, что приводит к $\delta'_{кв} = \frac{1,500}{0,457} = 3,28 \cdot 10^{-3}$ м.

Используя и аппроксимацию $H(B_{ст})$, получаем в этой точке $B_k = 1,825$ Тл и $B_{ст} = 1,67$ Тл с перераспределением неизменной МДС катушки $F_k = F_\delta + F_{ст} = 4790 + 1410 = 6200$ А; МДС зазора возросла почти в 4 раза, индукция — примерно в 1,8 раза относительно этих же параметров при полном перекрытии.

Если учесть некоторое снижение относительно максимума производной $dG(\xi)/d\xi$, которой пропорционально тяговое усилие, то все же получаемый эффект от работы в точке с меньшим перекрытием раза в 4 больше, чем при неизменном потоке, и удельное усилие $F' \approx (10 \div 15) \cdot 10^4$ Н/м² приведенного к полной площади рабочего зазора можно считать вполне реализуемым. Рабочий режим для принятых выше данных в точке $\xi = 0,25$ (0,5 полного перекрытия) дает $\cos 2\pi\xi = 0$ и $\sin 2\pi\xi = 1$; отношение $G/G_{\max} = 0,7$ и неизменная МДС 6200 А обеспечивает $F_k = 2330$ А. Это в 2 раза больше, чем при полном перекрытии. Ненасыщенность магнитопровода в рабочих режимах позволяет также (при наличии запаса момента приводного двигателя) форсировать усилие при кратковременных нагрузках путем подачи повышенного напряжения постоянного тока на катушку возбуждения. Существенное значение имеет металлоемкость протяженных элементов, располагаемых на пути, например, магнитопроводящего лотка 5 (рис. 4.11). Для обеспечения сечения при прохождении магнитного потока, не меньшего чем сечение участка с выступами 1, высота спинки магнитопроводящего лотка 5 должна быть примерно равна половине сечения всех выступов участка (около 1/4 осевой длины участка). Для уменьшения этой величины требуется применить многокатушечную («многополюсную») систему, как это показано на рис. 4.12 (кольца 4 здесь показаны условно — при наличии прорези в магнитопроводе 5 и зазоре между стенками катушки 3 и вращающимся на оси 1 цилиндром с нарезкой 2 катушки могут быть

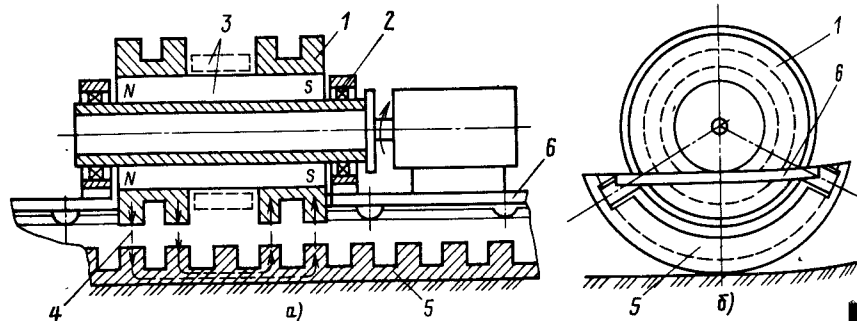


Рис. 4.11. Преобразователь движения:

а — схематичный продольный разрез; б — схематичный поперечный разрез



Высокое значение удельного усилия, отсутствие краевых эффектов, возможность выполнения многодвигательного привода при сколь угодно малых расстояниях между двигателями (в отличие, например, от линейных асинхронных двигателей, где эти расстояния велики) — технические преимущества рассматриваемой системы линейного привода, а использование обычных вращающихся электрических машин, организации производства лишь преобразователей движения, относительная дешевизна и простота в эксплуатации наиболее протяженной части — путевой структуры — преимущества экономические. При этом даже для относительно небольших скоростей поступательного движения например примерно 5 м/с, когда энергетический фактор ЛАД $\eta \cos \varphi \approx 0,1 \div 0,15$, можно использовать двигатели с $\eta \cos \varphi \geq 0,7$. При $\delta' = 1$ мм и $h_n = 20$ мм получаем при $n = 24$ об/с (1440 об/мин) линейную скорость $v = 24 \cdot 0,02 = 4,8$ м/с. Но при существенно более низких скоростях поступательного движения (например, $1,6 \cdot 10^{-3}$ м/с, что характерно для электрических исполнительных механизмов МЭП и аналогичных устройств) необходим многоступенчатый редуктор, значительно повышающий металлоемкость и снижающий КПД привода. Так, МЭП-1600, приводимый в движение двигателем в 160 Вт, имеет на выходе мощность 25 Вт, т. е. КПД передачи всего 16%, масса механизма 75 кг, удельная масса $m' = 3000$ кг/кВт. При использовании рассматриваемого электромагнитного преобразователя, выполняющего и функции ограничителя усилия или момента, необходимого в таких механизмах, возможно применение определенного вида «силового верньера», принципиальные конструктивные схемы которого изображены на рис. 4.13. Двигатель 3 вращает через шестеренную пару 4 гайку 2, сцепленную (элект-

В электромагнитном варианте можно обеспечить весьма быстрый реверс механизма, если установить дополнительную шестеренную пару, аналогичную паре 4 с гайкой 2, но создающую разность скоростей вращения винта обратного знака ($-\Delta n$). Тогда при переключении в стойке 11 катушек 10 обеих гаек будет происходить реверс с малой постоянной времени — реверсируется только винт 1 (у механизма типа МЭО-1600, как показывают расчеты, можно получить постоянную времени $T_m \leq 10^{-3}$ с — на два порядка меньше, чем у выпускаемых промышленностью механизмов).

Вариантно, для получения малой разностной «верньерной» частоты вращения Δn , например, равной частоте скольжения асинхронного двигателя, можно гайку 2 вращать синхронным двигателем, а муфту 7 — асинхронным (или наоборот), подключив эти двигатели к одной и той же многофазной сети. Наиболее компактным решением для этого явилось бы использование двигателя с многофазным статором с двумя, смещенными друг от друга, механически не связанными роторами, на одном из которых, например, установлена короткозамкнутая обмотка, а на другом — система возбуждения постоянного потока. Один ротор надо механически связать с гайкой 2, а другой — с муфтой 7. При установке нескольких гаек с нарезками разного шага или при направлении и выполнении на противостоящих участках винта 1 таких же нарезок, можно обеспечивать переключением катушек 10 электромагнитного возбуждения каждой гайки при неизменной частоте вращения приводного двигателя 3 (или роторов, описанных выше) быстрое дискретное управление скоростью движения танги 12.

В варианте исполнения преобразователя движения по рис. 4.13, и г, если требуется только преобразование поступательного или возвратно-поступательного движения с одними параметрами в движение аналогичного вида, но с другими параметрами, нет необходимости в использовании приводного двигателя 3, отмеченного на рис. 4.13, в штрихпунктирной линией.

Пусть элемент 18 перемещается вдоль направляющих со

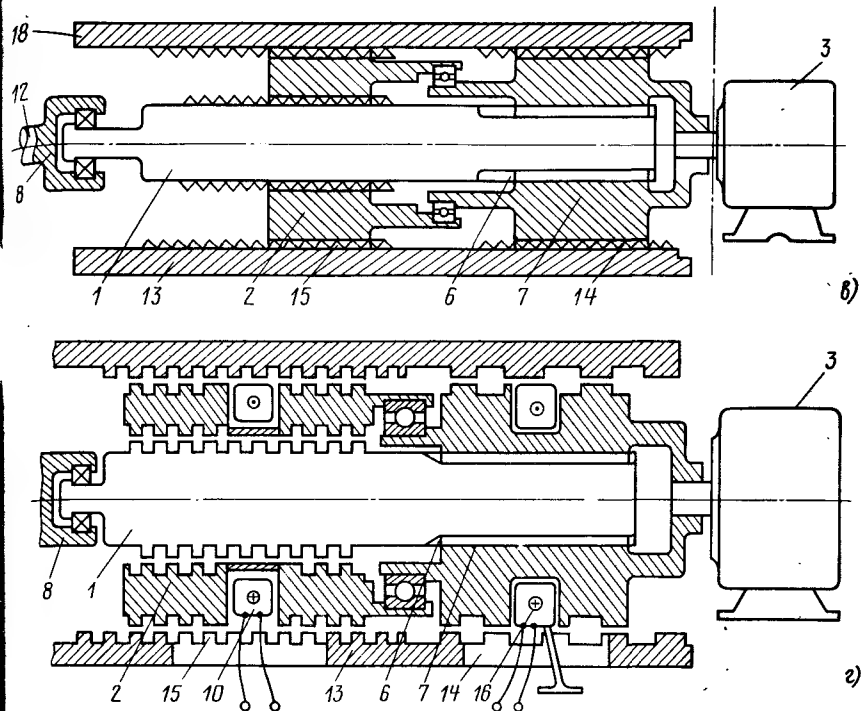
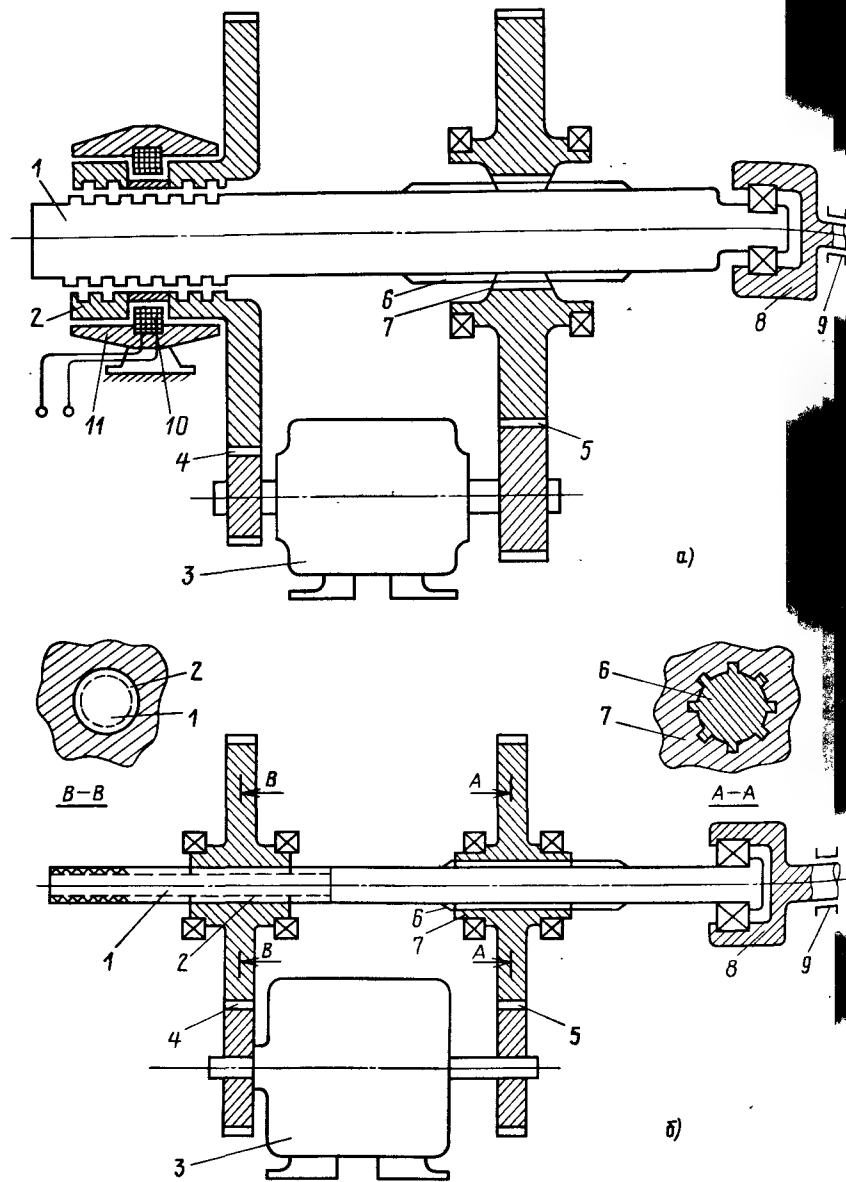


Рис. 4.13. Силовой верньер:

a — с электромагнитной связью; *б* — с механической связью; *а* — для преобразования параметров поступательного движения (вариант с механической связью); *з* — для преобразования параметров поступательного движения (вариант с электромагнитной связью)

скоростью v_1 ; его внутренняя нарезка 14, сцепленная с наружной нарезкой муфты 7, снабженной катушкой 16, вызовет вращение муфты и сцепленного с ней винта 1 с частотой вращения $n_b = v_1/h_m$, где h_m — шаг нарезки муфты. Но одновременно внутренняя нарезка 15 элемента 13, сцепленная с наружной нарезкой гайки 2, вызывает ее вращение в том же направлении с частотой вращения $n_t = v_1/h_t$, где h_t — шаг нарезки гайки. Скорость поступательного перемещения винта 1 относительно гайки 2 будет $v_2 = (n_t - n_b) h_b$, где h_b — шаг нарезки винта 1 и внутренней нарезки гайки 2.

Примем для количественной оценки

$$h_m = 40 \text{ мм}; h_t = 40,2 \text{ мм}; h_b = 40 \text{ мм}.$$

Тогда $v_2 = v_1 (1/h_m - 1/h_t) h_b = 5 \cdot 10^{-3} v_1$, т. е.

скорость перемещения и соответственно усилие изменяются в 200 раз. Домкратом, построенным по этому принципу, можно поднимать 1 т, прикладывая усилие в 5 кг при соответственно

большем перемещении руки, чем груза. И, наоборот, малое, но мощное перемещение (например, при тепловом расширении) может вызвать метровые перемещения. Если нужно при этом иметь вращающийся элемент в качестве приводящего или приводимого в движение, это можно выполнить по схеме на рис. 4.13, в, г (3).

При выполнении сцепления винта 1 и гайки или ряда гаек 2 электромагнитным способом схема по рис. 4.13, г приобретает все качества управления скоростью (частотой вращения) и реверсом, что и описанные выше устройства.

Важной задачей является создание электромеханической передачи, способной преобразовывать возвратно-поступательное движение в неограниченное однонаправленное вращательное движение (например, от поршней двигателя внутреннего сгорания непосредственно к рабочему валу или сколь угодно длинной полосе) и, наоборот, однонаправленное вращение — в возвратно-поступательное движение, например, от вала электродвигателя к штангам станка-качалки. При совмещении обеих функций можно осуществлять передачи вращения со значительным изменением скоростей $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2 \operatorname{tg} \beta_1}{r_1 \operatorname{tg} \beta_2}$ при неограниченном однонаправленном вращении [72], [83], [88].

Описанная в § 4.1 система линейного электропривода с электромагнитным винтовым сцеплением является лишь одним из вариантов частичного решения задачи, не охватывающего возвратно-поступательное движение; другой вариант приводится в конце настоящего параграфа. Более полное решение задачи преобразования возвратно-поступательного движения в неограниченное вращательное показано на рис. 4.14, ж, з.

На этих рисунках приняты следующие обозначения: 1 — основание; 2 — левая стойка; 3 — ведущий вал; 4 — его подшипники; 5 — направляющие; 6 — элемент с возвратно-поступательным движением (дуга гайки); 7 — его левый внутренний нарезанный участок — выступ; 8 — нарезка выступа, например, левоходовая, показана пунктирной линией на рис. 4.14, г; 9 — правый внутренний выступ элемента 6; 10 — его нарезка (правоходовая, показана пунктиром на рис. 4.14, г); 11 — центральный выступ элемента 6 с отверстиями для прохождения направляющих 5; 12 — ведущее кольцо; 13 — спицы колеса 12; 14 — крепежное кольцо; 15 — шпилька, скрепляющая кольца 14 и 12 с валом 3; 16 — левый нарезанный участок кольца 12; 17 — его нарезка (левоходовая, показана сплошными линиями на рис. 4.14, г); 18 — правый нарезанный участок кольца 12; 19 — его нарезка (правоходовая, показана сплошными линиями на рисунках 4.12, г); 20 — левый внешний выступ элемента 6; 21 — его нарезка (левоходовая, показана пунктиром на рис. 4.14, г); 22 — правый внешний выступ элемента 6; 23 — его нарезка

(правоходовая, показана пунктиром); 24 — наружное (ведомое) кольцо; 25 — выводная муфта со спицами, соединенными с кольцом 24; 26 — внутренний подшипник муфты 25; 27 — выводной (ведомый) вал; 28 — правая стойка; 29 — подшипник вала 27 в стойке 28; 30 — левый выступ кольца 24; 31 — его нарезка (левоходовая, показана сплошными линиями на рис. 4.14, г); 32 — правый выступ кольца 24; 33 — его нарезка (правоходовая, показана сплошными линиями на рис. 4.14, г); 34 — постоянный магнит; 35 — обмотка выступов 7 и 9 (полюсов); 36 — фигурная задняя стенка с вырезами, сквозь которые могут проходить выступы 9 и 22 элемента 6 (его выступы 7 и 20 могут соответственно проходить через вырезы стойки 2).

На рис. 4.14, а схематично показан продольный разрез устройства, причем для того чтобы оттенить принципиально важные участки нарезки, попадающие в разрез остальные части устройства не заштрихованы. Показана только одна часть гайки (элемента 6) с возвратно-поступательным движением. Фактически для обеспечения непрерывного движения наружного кольца 30 их должно быть по крайней мере два комплекта, сдвинутых вдоль образующей кольца 30 и находящихся в каждый момент времени в разных фазах возвратно-поступательного движения: например, со сдвигом фаз на четверть полного цикла (как показано на рис. 4.14, д). На рис. 4.14, б схематично показан поперечный разрез рабочей части устройства. Здесь также показаны штриховкой нарезки 8 и 17, 21 и 31 не заштрихованы попадающие в разрез детали.

На рис. 4.14, в принципиальные части — кольцо 12 и элемент гайки 6 — показаны в аксонометрии. На рис. 4.14, г показана развернутая в плоскость поверхность соприкосновения нарезки 1 и 17 (на выступе 7 и участка 16 соответственно), 10 и 23 на выступе 9 и участке 22); слева — для обеспечения одинаковой скорости движения в прямом и обратном направлениях элемента 6 при равномерном вращении кольца 12; справа — при заданном отношении этих скоростей. Верхний элемент 6 показан на этой развернутой поверхности в четырех последовательных своих положениях относительно кольца 12; при этом вместо перемещения вверх вдоль рисунка поверхности кольца 12 показано движение вниз верхнего элемента 6; остальные два элемента 6 показаны в одном положении I.

На рис. 4.14, д показаны развертка поверхности винта и под ней два независимых элемента гайки, каждый из которых связан, например, с соответствующим поршнем двигателя внутреннего сгорания — их циклические движения сдвинуты по фазе, что и отражено на рисунке.

На рис. 4.14, е показана модель варианта с механическим сцеплением, выполняющая преобразование вращательного движения в возвратно-поступательное и последовательное преоб-

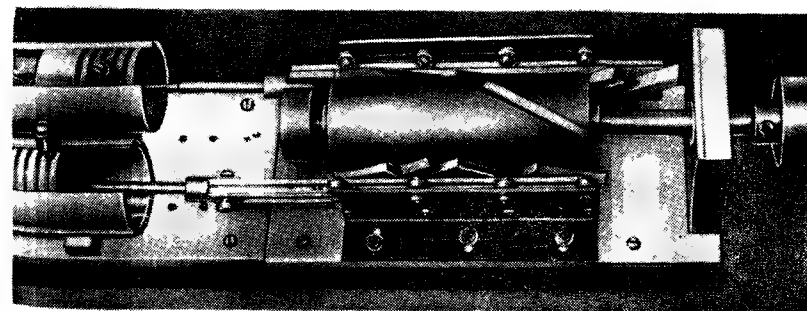
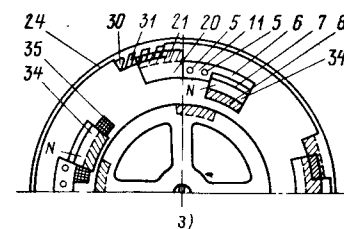
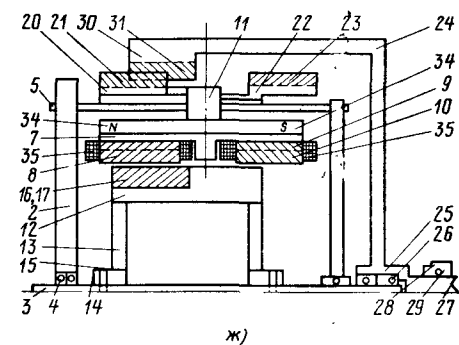
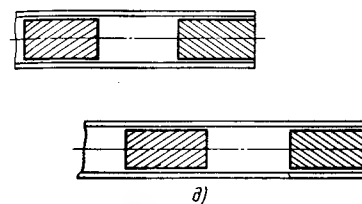
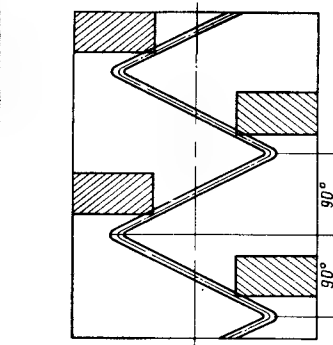
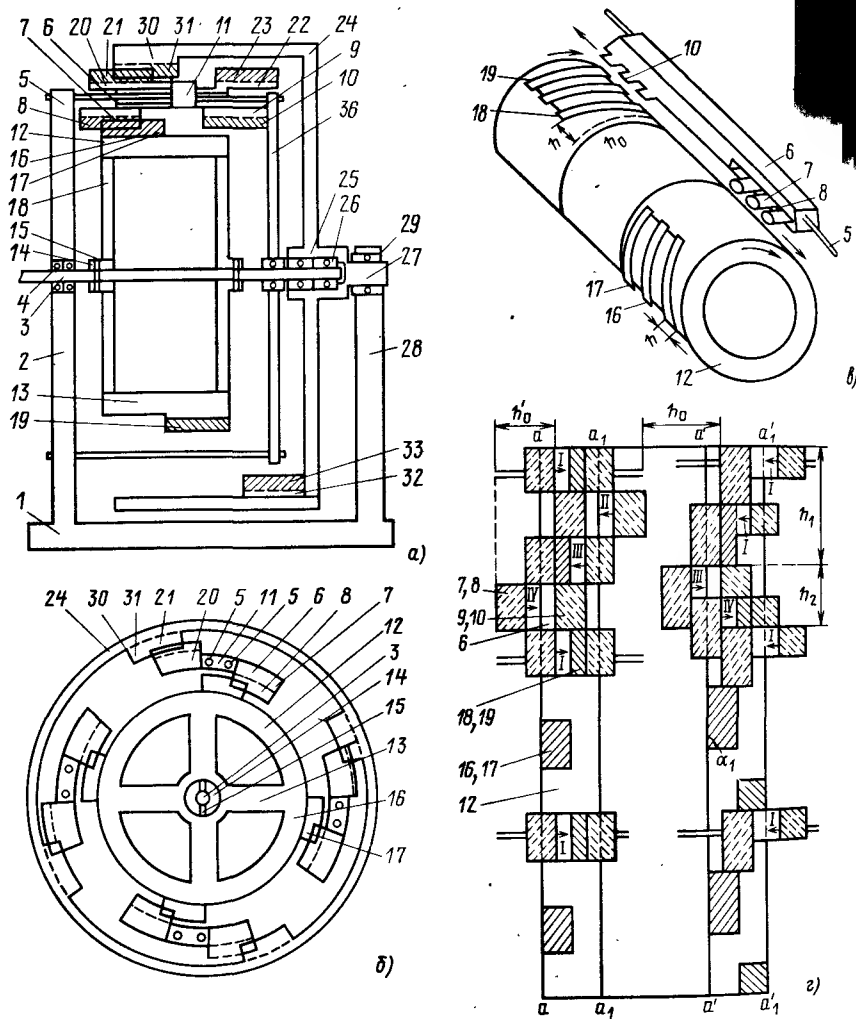


Рис. 4.14. Преобразователь движения:
 а, б, в, г, д — вариант с механической связью; е — фотография модели; ж, з — вариант с электромагнитной связью

разование возвратно-поступательного движения во вращательное.

На рис. 4.14, ж, з схематично изображены продольный (2) и поперечный (3) разрезы рабочей части устройства в электро-механическом варианте: построение аналогично рис. 4.14, а и б при выполнении внутреннего зацепления элемента 6 с кольцом 12 электромагнитным путем, для чего на одном из элементов предусмотрен постоянный магнит 34, а на другом также и подмагничивающая обмотка 35. Поверхность кольца 12 выполнена с невыступающими нарезанными участками 16 и 18.

Рассмотрим работу устройства в изображенном на рисунках наиболее сложном выполнении — для передачи неограниченного вращения вала 3 с угловой скоростью ω_1 ведомому валу 27 с угловой скоростью $\omega_2 = \omega_1 \frac{r_1 \operatorname{tg} \beta_2}{r_2 \operatorname{tg} \beta}$, где r_1 — средний радиус нарезки 17 и r_2 — средний радиус нарезки 31. При повороте кольца 12 (которому соответствует перемещение, например, вверх из положения 1 на развернутой поверхности кольца 12 на рис. 4.14, з) левоходовая нарезка 17 участка 16, взаимодействуя с такой же нарезкой 8 выступа 7 элемента 6, заставляет его перемещаться влево, причем центральный выступ 11 скользит вдоль направляющих 5. Это движение продолжается до тех пор, пока элемент 6, пройдя через положение II, не придет в положение III и не выйдет из зацепления. На рис. 4.14, з, как уже указывалось, вместо перемещения вверх поверхности кольца 12 показано адекватное ему перемещение вниз элемента 6. На этом участке движения элемента 6 нарезка 10 выступа не сцеплена с нарезкой 19 кольца 12. Но при продолжении вращения в том же направлении кольца 12 правоходовая нарезка 19 его правого участка 18 вступит во взаимодействие с правоходовой нарезкой 10 правого выступа 9 элемента 6 и заставит его перемещаться вправо, через положение IV в положение I, когда выйдут из зацепления нарезки 19 и 10; цикл возвратно-поступательного движения завершился.

При этом можно задать требуемый режим возвратно-поступательного движения элемента 6 (и связанной с ним нагрузки, если его движение используется непосредственно на какую-либо нагрузку). Так, например, при возвратно-поступательном движении рабочей части строгального станка требуется повышенная скорость обратного хода. Она может быть обеспечена при выполнении выступов с нарезками (правая часть рис. 4.14, з — перемещение влево на величину h_1 , совершается за время прохождения дуги h_1 , а вправо на ту же величину h_0 за время прохождения дуги h_2 с отношением линейных скоростей движения вправо v_2 и движения влево v_1 $v_2/v_1 = h_1/h_2$). Средние скорости возвратно-поступательного движения равны (левая часть рис. 4.14, з); выполнением выступа 7 и участка 16 и соответственно 9 и 18 может быть обеспечен заданный график колеба-

тельного движения элемента 6, например, по трапеции, достаточно близкой к синусоиде. Выполнением выступов 20 и 30, 22 и 32, помеченных на верхней части рисунка 4.14, з положениями I — IV, а также движущихся со сдвигом по фазе цикла колебания аналогичных внешних выступов элементов 6 можно задать в определенных пределах график вращения кольца 24, в частности, выполнить его равномерным.

Варианты механического сцепления, схематично показанные на рис. 4.14, а и б, и электромеханического сцепления по рис. 4.13, а и б различаются лишь использованием поверхности ведущего кольца 12 по передаваемому моменту. Они обладают достоинствами и недостатками соответствующих контактных и магнитных передач, но равно и превосходят их универсальностью, способностью преобразовывать все перечисленные выше виды движения с неограниченным диапазоном перемещения.

Следует указать, что показанное на рис. 4.14 взаимное расположение колец 12 и 24 не является единственно возможным; возможно их раздельное расположение, например, друг за другом (существенно лишь при этом разделить элемент 6 на два: один с выступами 7 и 9, сцепляющийся соответственно с участками 16 и 18 кольца 12, и второй, механически или с помощью синхронной связи связанный с первым, с выступами 20 и 22, сцепляющимися с выступами или нарезанными участками кольца 24).

При указанном на рисунках коаксиальном расположении колец возможно весьма компактное выполнение многократного преобразования скорости вращения, если установить, например, на внешней поверхности кольца 24 участка с нарезкой (вторые элементы гайки 6) и установить дополнительное внешнее кольцо. При трехкратном преобразовании можно иметь i порядка 7—10 тыс. в весьма компактном устройстве.

На основе описанного преобразователя движения возможно следующее:

1. Непосредственно преобразовать вращательное движение в возвратно-поступательное, например, для привода станка-качалки в нефтдобыче, где сейчас для такого преобразования применяется ременно-клиновая передача, редуктор и шатунно-кривошипный механизм. То же относится к электроприводу насосов, станков и других механизмов с возвратно-поступательным движением. При необходимости и здесь может быть применен «силовой верньер» по рис. 4.13.

2. Непосредственно преобразовывать, минуя коленчатый вал и в определенной степени редуктор, циклическое возвратно-поступательное движение, например, поршней двигателя внутреннего сгорания во вращательное движение, причем набор скоростей может осуществляться набором комплектов нарезок, приводимых в соприкосновение по выбору (подробнее ниже при рассмотрении рис. 4.15).

3. Выполнить компактный редуктор с высоким передаточным числом в одном модуле [колесо 12 — элемент 6 — колесо 24 (рис. 4.14, ж)] при вполне приемлемом КПД, особенно при выполнении его в электромеханическом варианте. Действительно, если выполнить угол наклона нарезок 21 и 31, $\beta = 42^\circ$, то при угле трения $\rho = 6\%$ КПД этой пары будет

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} (\beta + \rho)} = 0,81.$$

КПД электромагнитного сцепления, особенно при использовании постоянных магнитов 34 и невысоких скоростях, будет близко к 1, и можно достигнуть полного КПД редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0,8$. Если выполнить выступы на колесо 24 в виде устанавливаемых рядом шарикоподшипников, оси которых направлены по радиусу колеса, то можно иметь угол трения $\rho \leq 1,0^\circ$; тогда даже при механическом сцеплении на всех сцепляющихся поверхностях имеем, например, для $r_2 = 3r_1$, $\beta_1 = 80^\circ$ и $\beta_2 = 10^\circ$

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} = 100 \text{ при } \eta = \left(\frac{\operatorname{tg} 80^\circ}{\operatorname{tg} (80^\circ + 1^\circ)} \right)^2 = 0,807.$$

4. Создать неограниченное линейное движение, например, экипажа, снабженного совершающими циклическое возвратно-поступательное движение элементами 6 и 6' (по рис. 4.14) с нарезками 8 и 10 на каждом комплекте элементов, связанных непосредственно с поршнями двигателя внутреннего сгорания на экипаже относительно произвольной длины пути, снабженного участками 16 и 18 и 16' и 18' с нарезками 17 и 19 и 17' и 19' с заданным зазором между элементами 6, 6' и участками 16, 18 и 16', 18'; эти элементы заменят собой всю передачу от двигателя внутреннего сгорания к электрогенератору и весь линейный или обычный тяговой электропривод.

5. Решать задачи с помощью механизмов типа электродвигатель — муфта предельного момента — зубчатое колесо — рейка (например, привод стрелочных переводов на железнодорожном транспорте) [84].

Покажем, что именно вариант с электромагнитным сцеплением позволяет создать и многоскоростную систему с заданным количеством прямых и обратных скоростей с весьма высоким быстродействием. Такая система изображена на рис. 4.15, а — в. Несколько независимых возвратно-поступательных элементов (1, 2 на рис. 4.15, а) связаны, например, с поршнями различных цилиндров, со сдвинутыми по фазе движениями для достижения наибольшей равномерности. Элементы 1 и 2 скользят по направляющим 3, 4 и 5 и несут нарезки 6, 7 и соответственно 8, 9 с одним направлением, но с разным наклоном нарезок, во впадинах которых размещены катушки 10, подсоединенные к источнику

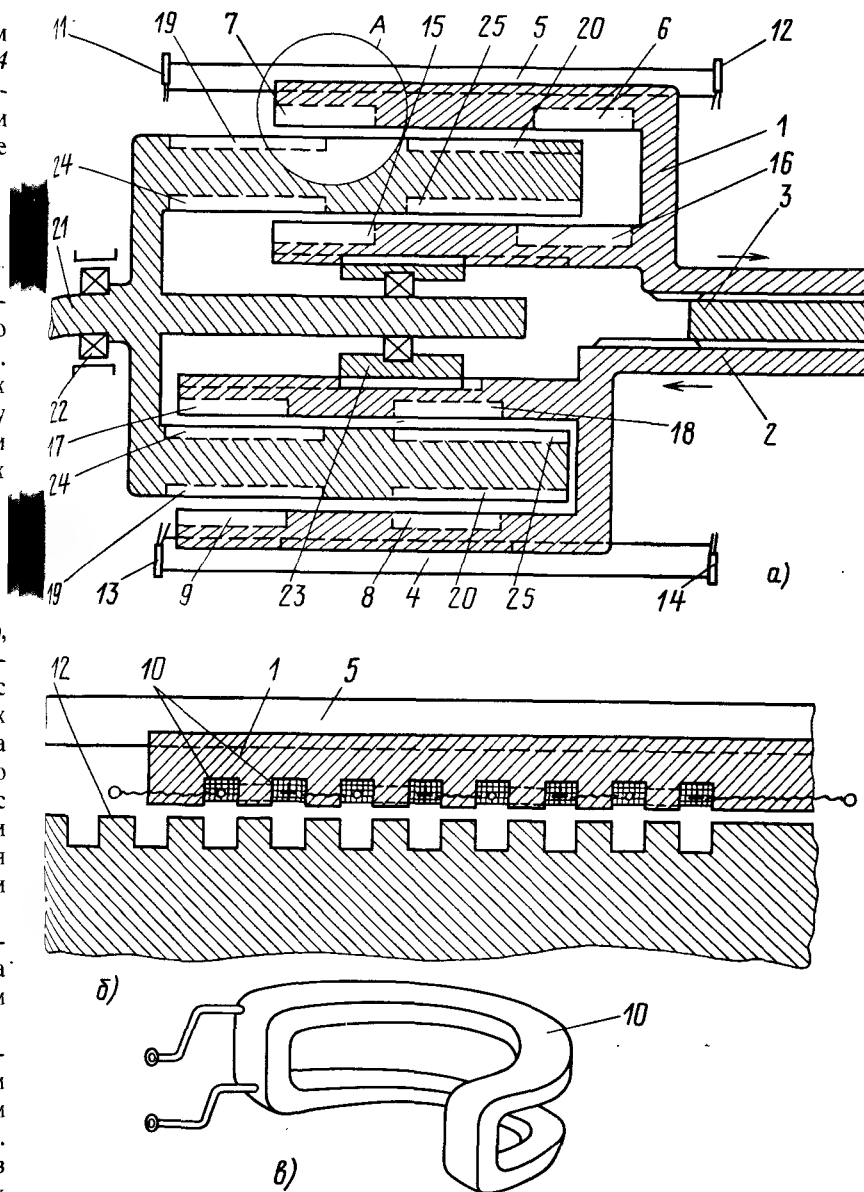


рис. 4.15. Электромеханический преобразователь движений поршней цилиндров двигателя внутреннего сгорания в однонаправленное вращение с заданными частотами вращения:
а — схема преобразователя; б — детализация нарезанной части; в — аксонометрия катушки, размещаемой в пазах нарезанной части

постоянного тока через концевой выключатель (11 либо 12 — для элемента 1; 13 или 14 — для элемента 2) и переключатель (на рисунке не показанный). Нарезки 15 и 16 во внутренней дуге элемента 1 и нарезки 17 и 18 на элементе 2 имеют встречные относительно наружных нарезок направления и разные наклоны; расположенные в их впадинах катушки подключены через концевой выключатель и переключатель к источнику тока в зависимости от направления движения элементов 1 и 2 и положения переключателя. Нарезки 6, 7 элемента 1 и 9, 10 элемента 2 взаимодействуют с аналогичными нарезками 19 и 20, расположенными на внешней окружности элемента 21, вращающегося в опорно-радиальных подшипниках 22 и подшипниках, расположенных во внутренних направляющих 23, а нарезки 15, 16 и 17, 18 — с нарезками 24 и 25 внутренней поверхности элемента 21.

Пусть в момент, показанный на рис. 4.15, а, в данном положении переключателя катушки нарезки 7 элемента через замкнутый концевой выключатель 11 подключены к источникам тока. Остальные катушки (элемента 1) выключены. Соответственно включены также катушки нарезки 17 элемента 2 (остальные катушки этого элемента выключены). Совместным взаимодействием потокосцеплений нарезок 7—19 и 17—24 элемент 21 приводится во вращение, например, по часовой стрелке. При достижении элементом 1 крайней точки своего движения (вправо — на рис. 4.15, а) концевой выключатель 12 отключает катушки нарезки 7 и подключает катушки нарезки 15, имеющей, как уже указывалось, обратное направление нарезки. Таким образом, при обратном ходе элемента 1 элемент 21 будет приводиться во вращение в том же направлении. Аналогично и независимо действует и элемент 2 — независимо от фазы его движения относительно элемента 1, и его возвратно-поступательное движение будет вызывать однонаправленное вращательное движение элемента 21. Для изменения частоты вращения элемента 21 при той же частоте колебаний элементов 1 и 2 достаточно переключателем подключить к концевым выключателям катушки нарезок 6 и 8 (соответственно 16 и 18). Для реверса достаточно переключать катушки к противоположным относительно указанных концевым выключателям. Таким образом может быть реализована электромагнитная коробка скоростей с кнопочным электропереключателем и высоким быстродействием. Электромагнитная постоянная времени переключения катушек может быть доведена до малых величин, например, введением форсирующих добавочных сопротивлений, а электромеханическая постоянная времени резко снижена, ибо в процессе реверсирования или изменения скорости участвует лишь момент инерции элемента 21. Аналогично обстоит дело и при создании поступательного движения — вращающийся приводной элемент не реверсируется.

Это принципиальное решение особо интересно для привода уст-

ройства, где требуется по заданной программе или в функции хода технологического процесса частое реверсирование и время реверса существенно сказывается на производительности устройства. Привод выполняется с однонаправленно вращающимся быстроходным двигателем, связанным с элементом 21 (рис. 4.15, а), а элемент 1 имеет винтовую нарезку на рабочем конце. Подключением переключателя к программной цепи можно, таким образом, обеспечить безредукторный привод устройств с быстрыми реверсами по заданной программе при нереверсируемом приводном двигателе.

Основным критерием для сравнительной оценки электромагнитного и механического сцеплений является реализуемое удельное усилие на площади взаимодействия и доля полезно используемой площади взаимодействия в общих габаритных размерах устройства. Для электромагнитного сцепления предельное значение удельного усилия для практически реализуемых индукций будет около $10 \cdot 10^4$ Н/м².

Значение этой величины для механического сцепления намного больше. Действительно, если принять при грубой оценке в качестве предела прочности $F = 400$ Н/мм² = $4 \cdot 10^6$ Н/м² и считать, что не оставляющая никаких остаточных деформаций при практически неограниченной продолжительности работы, связанной с соударениями, величина будет примерно в 20 раз меньше, то имеем $F'_{\text{мех}} \approx 2 \cdot 10^5$ Н/м², примерно в 200 раз большую, чем при электромагнитном сцеплении. Площадь фактического механического взаимодействия, например, у зубчатой шестеренной пары составляет величину порядка $1/(z_1 + z_2)$ площади ободов шестерен, и при числе зубьев $z_1 = 16$ и $z_2 = 64$ рабочая площадь сцепления меньше полной площади наружной поверхности вращающихся частей примерно в 80 раз. При использовании примерно 0,8 площади зазора у электромагнитного сцепления эффективность использования указанной поверхности ниже у электромагнитного сцепления примерно лишь втрое.

4.3. СРАВНИТЕЛЬНОЕ РАССМОТРЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ СОЗДАНИЯ НИЗКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В качестве таких типовых задач рассмотрим:

- 1) привод небольших поступательных перемещений относительно малой мощности;
- 2) привод значительных возвратно-поступательных перемещений средней мощности;
- 3) привод барабанного вакуум-фильтра средней мощности, но с малой частотой вращения выходного вала (до 1 об/мин);
- 4) привод эскалатора метро значительной мощности (100—125 кВт), но с низкой частотой вращения выходного вала (9,5 об/мин).

Конечно, речь идет не о техническом проектировании всех этих типов приводов в нескольких вариантах, а о сравнительной приближенной оценке, позволяющей определить рациональность применения того или иного варианта решения для данного класса приводов. Для МДД в соответствии с соображениями, приведенными в предыдущем параграфе, проводятся рассмотрение и выбор основных размеров, дается оценка массо-габаритных показателей; расчет базовых модулей по действующей методике дается сколько-нибудь подробно только для примера рольгангового привода.

Для сравнительной оценки различных приводов поступательного движения рассмотрим задачу, решаемую в настоящее время преимущественно электрогидравлическими толкателями [19]. Это устройство достаточно массового использования. По данным, приведенным в [19], масштаб их применения только для комплектации подъемно-транспортных механизмов примерно 300—400 тыс. шт. в год. Проведем сравнение образцов, по своим параметрам близких к МДД П (поступательного движения), описанной в § 4.1.

Для сравнения рассмотрены широко применяемые трехфазные электромагниты КМТ-7А с тем же ходом $l = 80$ мм, но примерно вдвое большим тяговым усилием ($F \approx 1400$ Н при ПВ = 40%, что соответствует $F \approx 800 \div 900$ Н при ПВ = 100% у КМТ-7А против $F \approx 500$ Н при ПВ = 100% у МДДП), гидротолкатель ТГМ-80 с ходом $l = 50$ мм и усилием при ПВ = 100% $F \approx 800$ Н, электротолкатель Т45Б с ходом $l = 50$ мм при усилии $F \approx 450$ Н и Т75Б с ходом $l = 80$ мм при усилии $F \approx 750$ Н, электротолкатель фирмы АЕГ (ФРГ) Ed-2 с ходом $l = 75$ мм и усилием $F \approx 450$ Н (все параметры довольно близки к параметрам рассматриваемого МДДП), а также выпускаемый в НРБ [99] плоский короткоходовой линейный асинхронный двигатель ЛИД-ММ 14/3,8 с ходом около 0,36 м, пусковым усилием при ПВ = 15% $F_n = 240$ Н, синхронной скоростью $v_c = 3,8$ м/с (при ПВ = 100% и примерно линейной механической характеристикой имеем $v_{\text{раб}} = 1,9$ м/с; $F_{\text{раб}} \approx 50$ Н) и цилиндрический линейный двигатель [31], имеющий при $v_{\text{раб}} \approx 0,3$ м/с и ПВ = 100% усилие $F \approx 60$ Н. В этом последнем двигателе обеспечивается наибольшее использование площади взаимодействия первичной и вторичной частей машины. Так как между сравниваемыми устройствами нет полной идентичности выходных параметров, то для получения сравниваемой информации приняты показатели: удельная масса всего привода, кг/кВт, $m'_{\text{пр}} = m/P_{\text{ср}}$, где m — масса всего устройства, а $P_{\text{ср}}$ — его средняя мощность, рассчитываемая как отношение полной работы (в кН·м) $W = Fl$ к времени рабочего хода в секундах, а также удельная масса, кг/(кН·м), $m''_{\text{пр}} = m/W$ — величина, аналогичная отношению массы машины к моменту на ее оси у вращающихся машин. У МДДП масса статора, как уже

указывалось, $m_c \approx 12$ кг, масса ротора при ходе в 0,08 м $m_p \approx 3$ кг и масса остальных конструктивных элементов $m_k \approx 1,5$ кг, т. е. $m_{\text{общ}} \approx 16,5$ кг. При $v = 0,3$ м/с время рабочего хода $l = 0,08$ м определяется как $t = (l/v) + \Delta t$, где Δt — время переходного процесса, $\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-2}$ с при разгоне под нагрузкой, а без нагрузки время достижения скорости $v = 0,3$ м/с, $\Delta t \approx 5 \times 10^{-3}$ с. Отсюда $t = 0,3$ с; выполняемая работа $W = 0,5 \cdot 0,08 = 0,04$ кН·м; $P_2 = 0,133$ кВт; $m'_{\text{пр}} \approx 125$ кг/кВт; $m''_{\text{пр}} \approx 415$ кг/(кН·м).

У трехфазного электромагнита КМТ-7А при ПВ = 40% $W = 0,112$ кН·м; при ПВ = 100% $W \approx 0,068$ кН·м; $m = 213$ кг; $m''_{\text{пр}} = 3140$ кг/(кН·м); масса меди $m_m = 29$ кг и $m''_{\text{пр.м}} = 425$ кН·м (при ПВ = 40% $m''_{\text{пр.м}} = 258$ кг/(кН·м)).

У гидротолкателей ТГМ-80 $W = 0,04$ кН·м; масса $m = 29$ кг и $m''_{\text{пр}} \approx 725$ кг/(кН·м); у электрогидротолкателей Т45Б $W = 0,0225$ кН·м; масса $m = 37$ кг и $m''_{\text{пр}} = 1640$ кг/(кН·м); время рабочего хода $t = 0,7$ с; $P_2 = 0,032$ кВт; $m'_{\text{пр}} = 1150$ кг/кВт. На толкателе Т45Б установлен электродвигатель мощностью 0,12 кВт; если во время рабочего хода его мощность используется полностью, то эквивалентный КПД гидравлической части устройства $\eta_{\text{экв}} \approx 0,27$. У электродвигателя Т75Б эти показатели немного лучше: $W = 0,06$ кН·м при массе $m = 51$ кг, т. е. $m'_{\text{пр}} = 850$ кг/(кН·м); время рабочего хода $t = 0,8$ с; $P_2 = 0,075$ кВт и $m'_{\text{пр}} = 680$ кг/кВт. Мощность установленного на Т75Б двигателя 0,18 кВт, а $\eta_{\text{экв}} \approx 0,4$, т. е., как обычно, у больших устройств показатели лучше.

Не слишком отличаются от этих данных показатели электрогидротолкателя АЕГ Ed-2: $W \approx 0,034$ кН·м; $m = 23$ кг; $t = 0,76$ с; $P_2 = 0,045$ кВт; $m'_{\text{пр}} = 525$ кг/кВт; $m''_{\text{пр}} = 660$ кг/(кН·м); установлен электродвигатель мощностью в 0,2 кВт. При полном использовании этой мощности во время рабочего хода имеем для гидравлической части установки $\eta_{\text{экв}} \approx 0,225$. При обычном КПД $\eta \approx 0,6$ для двигателей мощностью порядка долей киловатт имеем для всего устройства $\eta \approx 0,135$ — довольно близкое значение к КПД линейных двигателей при малых скоростях движения (здесь $v_{\text{ср}} = l/t = 0,1$ м/с).

В качестве линейного привода для этой задачи ограничимся рассмотрением уже неоднократно упоминавшегося выше цилиндрического линейного асинхронного двигателя НЭТИ, обеспечивающего скорость перемещения $v \approx 0,27$ м/с; применять здесь ЛДПТ с коллектором или любым преобразователем, по-видимому, нецелесообразно.

Для двигателя НЭТИ: производимая работа $W = 0,0216$ кН·м; при массе $m = 9,8$ кг имеем $m''_{\text{пр}} = 454$ кг/(кН·м); рабочая скорость $v = 0,3$ м/с; $P_2 = 0,018$ кВт и $m'_{\text{пр}} = 544$ кг/кВт.

Для плоского короткоходового линейного асинхронного электродвигателя $W = 0,018$ кН·м; при массе всей машины $m =$

$= 20$ кг (масса статора $m_c = 14$ кг) имеем $m''_{пр} = 1100$ кг/(кН·м). Более высокая скорость рабочего хода $v = 1,9$ м/с при $P_2 = 0,095$ кВт обеспечивает этой машине несколько лучший показатель $m' = 210$ кг/кВт.

Результаты проведенного анализа сведены в табл. 4.1, наглядно иллюстрирующую существенные преимущества применения для этого класса задач именно машины двойного движения поступательного типа, особенно если учесть высокую надежность такой машины и простоту ее обслуживания.

У электрогидротолкателей на малые усилия электродвигатель, приводящий в движение центробежный насос, погружен в рабочую жидкость, а на усилия более 50 кг он отделен от рабочей жидкости уплотнением на валу и весь аппарат обдувается венти-

Таблица 4.1. Результаты сравнения короткоходовых приводов поступательного движения

№ п/п	Тип привода	F при ПВ=100%, Н	l , м	W , кН·м	m , кг	m'' (кН·м) кг/(кН·м)	$\frac{t_{раб}}{t_{xx}}$, с	P_2 , кВт	m' , кг/кВт
1	Трехфазный электромагнит КМТ7А	850	0,08	0,068	213	3140	—	—	—
2	Гидротолкатель ТГМ-80	800	0,05	0,04	29	725	—	—	—
3	Электротолкатель Т45Б-100	450	0,05	0,0225	37	1640	$\frac{0,7}{0,071}$	0,032	1125
4	Электрогидротолкатель Т75Б	750	0,08	0,06	51	850	$\frac{0,8}{0,2}$	0,075	680
5	Электрогидротолкатель фирмы АЕG Ed-2	450	0,075	0,034	23	660	$\frac{0,76}{0,1}$	0,045	525
6	Плоский линейный асинхронный двигатель типа ЛИД-ММ 14/3,8	50	0,36	0,018	20	1100	$\frac{0,19}{1,9}$	0,095	210
7	Цилиндрический линейный асинхронный двигатель НЭТИ МДДП	60	0,36	0,0216	9,8	454	$\frac{1,2}{0,3}$	0,018	544
8	МДДП	500	0,08	0,04	16,5	415	$\frac{0,3}{0,3}$	0,133	125

лятором, насаженным на свободный конец вала электродвигателя.

Для потребителей, где требуется ускоренное опускание штока, фирма АЕG комплектно с толкателем поставляет конденсаторы, которые подключаются параллельно статорной обмотке электродвигателя толкателя, создавая тем самым после снятия питающего напряжения динамическое торможение вращающихся частей и обеспечивая этим быстрое опускание штока.

Сравнительное рассмотрение различных типов безредукторного электропривода для значительных возвратно-поступательных движений средней мощности проведем на примере привода станка-качалки 4СК-3-1,2 с максимальным значением усилия в 3 т ($3 \cdot 10^4$ Н) при ходе 1,2 м и числе качаний 5—15 в минуту. Расчет ведем для 10 качаний в минуту, т. е. для средней скорости $v = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10}{60} = 0,4$ м/с; в качестве расчетной величины принимаем $v = 0,5$ м/с. При максимальном усилии $F = 3 \cdot 10^4$ Н имеем максимальную мощность $P_{\max} = 15$ кВт. Следует отметить, что у штатного станка-качалки установленная мощность дви-

гателя

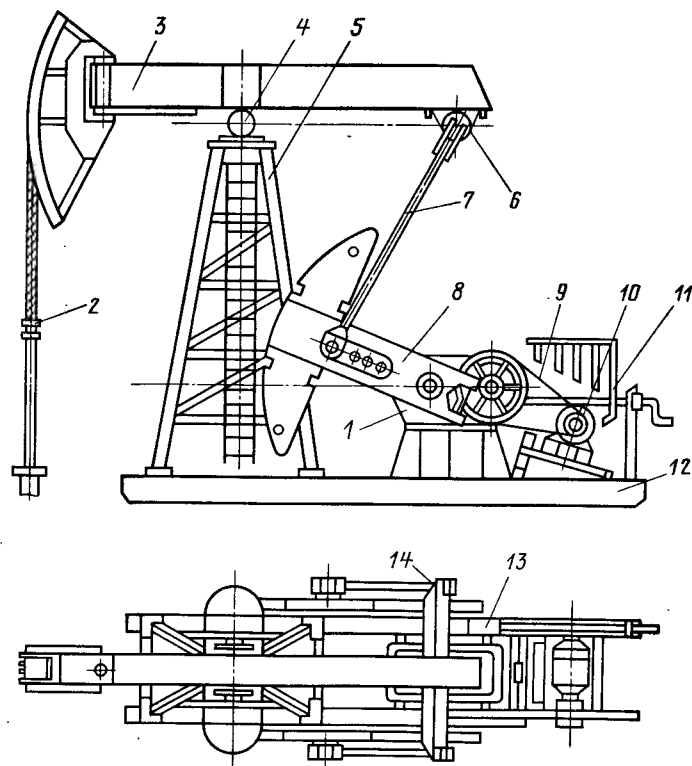
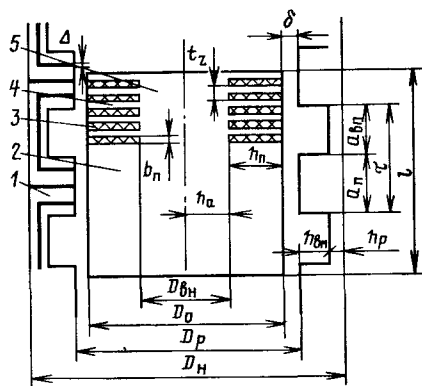


Рис. 4.16. Общий вид станка-качалки



$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + K_D \frac{dx}{dt} + F(x) = mg, \quad (4.20)$$

Рис. 4.17. Безредукторный привод системы штанг станка-качалки на базе ЛДПТ с двухфункциональной обмоткой

положения секций статоров и полюсов ротора, сигналы которых управляют тиристорными ключами с естественной коммутацией (невысокая частота переключения секций соответственно низкой скорости движения позволяет обеспечить такую коммутацию и при частоте питания в 50 Гц), и логической схемы с концевыми выключателями, определяющих направления движения. Ввиду малого значения реактивной ЭДС (при одновитковых секциях $e_p \approx 1,26$ В) можно применить неподвижный линейный коллектор (если этого требуют условия техники безопасности — в герметичном корпусе и в масле или другой среде), к ламелям которого подведены две системы отпаек от трансформатора (с выпрямительными устройствами); причем выбор системы отпаек («вверх» или «вниз») производится системой конечных выключателей, а система щеток электрически связана с секциями машины и механически — с движущимся ротором. Расчет проведен для трех вариантов: двух — с одинаковыми размерами и разными коэффициентами заполнения медью сечения плоских цилиндрических катушек статора машины (0,4 и 0,6). Значение этого коэффициента 0,6 представляется вполне достижимым для тонких катушек, и в качестве основного для проектирования безредукторного привода станка-качалки может быть рекомендован вариант, при котором общая масса на 1000 кг меньше, чем у штатного станка-качалки (2400 кг против 3400 кг), масса статора лишь в 1,5 раза больше, чем масса одного редуктора у штатного станка-качалки (700 кг), а КПД достигает вполне приемлемого значения $\eta = 0,6$ при столь низких плотностях тока в катушках (около $2 \cdot 10^6$ А/м²), что машина при естественном охлаждении будет иметь низкую температуру перегрева и, следовательно, весьма большую долговечность.

При оценке сравнительных показателей безредукторного привода и обычного редукторного привода станка-качалки следует также учесть, что приведенный ниже расчет исходит из полезной мощности в 15 кВт на тяге системы штанг, тогда как штатный двигатель станка-качалки имеет на валу мощность в 7 кВт, т. е. расчет дает запас в 2–2,5 раза. Следовало бы также сопоставить удельную массу штатного станка-качалки $m'_{ред} = 486$ кг/кВт с удельной массой рекомендуемого безредукторного привода $m'_{б.р} = 160$ кг/кВт, что дополнительно подтверждает явное преимущество безредукторного решения. Некоторое увеличение КПД (с 0,6 до 0,615) у варианта ЦЛДПТ с $D_a = 0,65$ м не окупает резкого повышения массы.

Вариант с обмоткой на роторе достигается слишком дорогой ценой — резким повышением массы ротора.

Расчет обращенного цилиндрического линейного автосинхронного двигателя

Исходные данные:

максимальное тяговое усилие $F_{т max} = 3 \cdot 10^4$ Н;

скорость $v = 0,5$ м/с;

воздушный зазор $\delta = 0,005$ м;

коэффициент полюсной дуги $\alpha_p = 0,5$;

число пазов на полюсное деление $q_p = 6$;

полюсное деление $\tau = 0,2$ м;

ширина разреза полюса $a = 0,005$;

суммарная ширина разрезов вторичной части $\Sigma \Delta = 0,015$ м;

длина статора $l = 0,8$ м;

число полюсов $2p = 4$.

1. Принимаем $B_\delta = 0,65$ Тл и $A = 90 \cdot 10^3$ А/м.

2. Зубцовое деление $t_z = \tau/q_p = 0,2/6 = 0,0333$ м.

3. Ширина зубца при $B_z = 1,5$ Тл и $K_{ct} = 0,95$

$$b_z = \frac{B_\delta t_z}{B_z K_{ct}} = \frac{0,65 \cdot 0,0333}{1,5 \cdot 0,95} = 0,0152 \text{ м.}$$

4. Ширина паза

$$b_n = t_z - b_z = 0,0333 - 0,0152 = 0,0181 \text{ м.}$$

5. Диаметр статора $D_c = 0,5$ м.

6. Внутренний диаметр спинки статора при $B_c = 1,4$ Тл

$$D_{вн} = \sqrt{\frac{2B_\delta a_n D_c}{B_c K_{ct}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,65 \cdot 0,1 \cdot 0,5}{1,4 \cdot 0,9}} = 0,227 \text{ м.}$$

7. Наружный диаметр машины при $B_p = 1,3$ Тл из равенства

$$\frac{2B_\delta a_n D_a}{B_p} = D_n^2 - (D_p + 2h_{вн})^2;$$

$$D_n = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,65 \cdot 0,1 \cdot 0,5}{1,3} + (0,51 + 0,1)^2} = 0,65 \text{ м,}$$

где $a_n = a_p = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1$ м;

$$h_{вн} = 0,25\tau = 0,25 \cdot 0,2 = 0,05 \text{ м.}$$

8. Высота спинки статора

$$h_c = \frac{D_{вн}}{2} = \frac{0,227}{2} = 0,1135 \text{ м.}$$

9. Высота спинки вторичной части

$$h_p = \frac{D_n - D_p - 2h_{вн}}{2} = \frac{0,65 - 0,51 - 2 \cdot 0,05}{2} = 0,02 \text{ м.}$$

10. Высота паза

$$h_n = \frac{D_n - D_{вн}}{2} = \frac{0,5 - 0,227}{2} = 0,1365 \text{ м.}$$

11. Коэффициенты воздушного зазора

$$K_\delta = K_{\delta 1} K_{\delta 2};$$

$$K_{\delta 1} = \frac{t_z + 10\delta}{b_z + 10\delta} = \frac{0,0333 + 0,05}{0,0152 + 0,05} = 1,278;$$

$$K_{\delta 2} = \frac{t_p + 10\delta}{b_p + 10\delta} = \frac{0,0275 + 0,05}{0,0225 + 0,05} = 1,069;$$

$$K_\delta = K_{\delta 1} K_{\delta 2} = 1,278 \cdot 1,069 = 1,366.$$

12. МДС воздушного зазора

$$F_\delta = 1,6B_\delta K_\delta \delta \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,65 \cdot 1,366 \cdot 0,005 \cdot 10^6 = 7104 \text{ А.}$$

13. МДС зубцов

$$F_z = H_z 2h_n = 25 \cdot 2 \cdot 13,65 = 682,5 \text{ А.}$$

14. МДС спинки статора

$$F_c = H_c (\tau + h_c) = 15,8 (20 + 11,35) = 495,3 \text{ А.}$$

15. МДС спинки вторичной части

$$F_p = H_p (\tau + 2h_{вн} + h_p) = 14,2 (20 + 10 + 2) = 454,4 \text{ А.}$$

16. Суммарная МДС магнитной цепи на холостом ходе

$$F = F_\delta + F_z + F_a + F_p = 7104 + 682,5 + 495,3 + 454,4 \approx 8736 \text{ А.}$$

17. Коэффициент насыщения

$$K_\mu = \frac{F}{F_\delta} = \frac{8736}{7104} = 1,23.$$

18. Магнитное сопротивление разрезов вторичной части

$$R_{\Sigma\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Sigma\Delta}{\frac{\pi}{4}(D_n^2 - D_p^2)} = \frac{0,015}{\mu_0 \frac{\pi}{4}(0,65^2 - 0,51^2)} = \frac{0,118}{\mu_0}.$$

19. Магнитное сопротивление воздушного зазора в области полюса

$$R_n = \frac{4\delta K_\delta}{\mu_0 a_n \pi D_c} = \frac{4 \cdot 0,005 \cdot 1,366}{\mu_0 \cdot 0,1\pi \cdot 0,5} = \frac{0,174}{\mu_0}.$$

20. МДС обмотки якоря, действующая в зазоре,

$$F_{c\delta} = A a_n \frac{R_n}{R_m + R_{\Sigma\Delta}} = 90\,000 \cdot 0,1 \frac{0,174}{0,174 + 0,118} = 5364 \text{ А.}$$

21. По переходной характеристике $B_\delta = f(F_\delta + F_z)$ определяется магнитная индукция в зазоре при нагрузке

$$B_{\delta n} = 0,592 \text{ Тл}$$

22. МДС поперечной реакции якоря

$$F_{cq} = 1 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

23. Для получения $B_{\delta n} = 0,65 \text{ Тл}$ необходимо обеспечить МДС

$$\Sigma F = F + F_{cq} = 8736 + 1000 = 9736 \text{ А.}$$

24. Магнитное сопротивление воздушного зазора в области впадин

$$R_{вп} = \frac{4\delta K_\delta}{\mu_0 K a_n \pi D_p} = \frac{4 \cdot 0,005 \cdot 1,366}{\mu_0 \cdot 0,21 \cdot 0,1\pi \cdot 0,51} = \frac{0,812}{\mu_0}.$$

25. Коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента магнитной проводимости за счет разрезов вторичной части,

$$f = \frac{R_{вп}}{R_{вп} + R_{\Sigma\Delta}} = \frac{0,812}{0,812 + 0,118} = 0,873.$$

26. Сила тяги двигателя

$$F_\tau = \alpha_t A B_\delta \pi D_c (1 - Kf) = 0,5 \cdot 90\,000 \cdot 0,65 \cdot 0,8\pi \cdot 0,5 (1 - 0,21 \cdot 0,873) = 3 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

27. Удельная сила тяги

$$F'_\tau = \frac{F_\tau}{S_{\text{як}}} = \frac{3 \cdot 10^4}{0,8\pi \cdot 0,5} = 2,39 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2.$$

28. Площадь паза

$$S_n = b_n h_n = 18,1 \cdot 136,5 = 2471 \text{ мм}^2.$$

29. Площадь меди паза при двух вариантах (I и II) коэффициента заполнения

I. $K_3 = 0,4$;

$$S_m = S_n K_3 = 2471 \cdot 0,4 = 988,4 \text{ мм}^2.$$

II. $K_3 = 0,6$;

$$S_m = 2471 \cdot 0,6 = 1547,6 \text{ мм}^2.$$

30. Ток паза якоря

$$I_{н.с} = A t_z = 90 \cdot 10^3 \cdot 0,0333 = 2997 \text{ А.}$$

31. Ток паза возбуждения

$$I_{н.в} = \frac{\Sigma F}{0,5 q_t} = \frac{9736}{0,5 \cdot 6} = 3245,3 \text{ А.}$$

32. Плотность тока в обмотке якоря

$$I. j_c = \frac{I_{н.с}}{S_n} = \frac{2997}{988,4} = 3,03 \text{ А/мм}^2.$$

$$II. j_c = \frac{2997}{1547,6} = 1,94 \text{ А/мм}^2.$$

33. Плотность тока в обмотке возбуждения

$$I. j_v = \frac{I_{н.в}}{S_m} = \frac{3245,3}{988,4} = 3,28 \text{ А/мм}^2.$$

$$II. j_v = \frac{3245,3}{1547,6} = 2,1 \text{ А/мм}^2.$$

34. Масса стали зубцов

$$m_z = 7,8 \cdot 10^3 b_z K_{ct} \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_{вп}^2) \cdot 2 p q_t = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,0152 \cdot 0,95 \frac{\pi}{4} \times \\ \times (0,5^2 - 0,227^2) \cdot 4 \cdot 6 = 421 \text{ кг.}$$

35. Масса стали спинки статора

$$m_c = 7,8 \cdot 10^3 K_{ct} I \frac{\pi}{4} D_{вп}^2 = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \frac{\pi}{4} 0,227^2 = 227,2 \text{ кг.}$$

36. Частота перемагничивания

$$f = \frac{\nu}{2\tau} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,2} = 1,25 \text{ Гц.}$$

37. Потери в зубцах

$$\Delta P_z = 2,55 m_z (0,044 f + 5,6 f^2 \cdot 10^{-4}) B_z^2 = \\ = 2,55 \cdot 421 (0,044 \cdot 1,25 + 5,6 \cdot 1,25^2 \cdot 10^{-4}) \cdot 1,5^2 = 135 \text{ Вт.}$$

38. Потери в спинке статора

$$\Delta P_c = 2,55 m_c (0,044 f + 5,6 f^2 \cdot 10^{-4}) B_c^2 = \\ = 2,55 \cdot 227,2 (0,044 \cdot 1,25 + 5,6 \cdot 1,25^2 \cdot 10^{-4}) = 63,5 \text{ Вт.}$$

39. Потери в стали

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_z + \Delta P_c = 135 + 63,5 = 198,5 \text{ Вт.}$$

40. Добавочные потери

$$\Delta P_{доб} = 0,3 \Delta P_{ст} = 0,3 \cdot 198,5 \approx 60 \text{ Вт.}$$

41. Эквивалентное сопротивление обмотки якоря (возбуждения) при 20°С

$$I. R_{экв} = 1,8 \cdot 10^{-2} \frac{\pi (D_a - h_n)}{0,5 q_t S_m} = 1,8 \cdot 10^{-2} \frac{\pi (0,5 - 0,1365)}{0,5 \cdot 6 \cdot 988,4} = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

$$II. R_{экв} = 1,8 \cdot 10^{-2} \frac{\pi (0,5 - 0,1365)}{0,5 \cdot 6 \cdot 1547,55} = 4,23 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

42. Потери в обмотке якоря

$$I. \Delta P_c = (A a_n)^2 R_{\text{як}} \cdot 2p = (90 \cdot 10^3 \cdot 0,1)^2 \cdot 6,9 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 2235 \text{ Вт.}$$

$$II. \Delta P_c = (90 \cdot 10^3 \cdot 0,1)^2 \cdot 4,23 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 1433,4 \text{ Вт.}$$

43. Потери в обмотке возбуждения

$$I. \Delta P_{\text{в}} = F^2 R_{\text{як}} \cdot 2p = 9736^2 \cdot 6,9 \cdot 10^{-6} = 2616 \text{ Вт.}$$

$$II. \Delta P_{\text{в}} = 9736^2 \cdot 4,23 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 1678 \text{ Вт.}$$

44. Суммарные потери в двигателе

$$I. \Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{доб}} = 2235 + 2616 + 198,5 + 60 \approx 5110 \text{ Вт.}$$

$$II. \Delta P = 1433,4 + 1678 + 198,5 + 60 = 3370 \text{ Вт.}$$

45. Полезная мощность

$$P_2 = F_{\text{т}} v = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,5 = 15000 \text{ Вт} = 15 \text{ кВт.}$$

46. Коэффициент полезного действия

при $K_3 = 0,4$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 \frac{1+Kf}{1-Kf} + \Delta P} = 0,559 \approx 0,56;$$

при $K_3 = 0,6$

$$\eta = 0,598 \approx 0,6.$$

47. Масса меди обмотки

при $K_3 = 0,4$

$$m_{\text{м}} = 8,9 \cdot 10^3 \pi (D_a - h_n) S_{\text{м}} \cdot 10^{-6} p q_t = 241 \text{ кг};$$

при $K_3 = 0,6$

$$m_{\text{м}} = 8,9 \cdot 10^3 \pi (0,5 - 0,1365) \cdot 1547,6 \cdot 4 \cdot 6 = 377,3 \text{ кг.}$$

48. Масса статора

при $K_3 = 0,4$

$$m_{\text{с}} = m_z + m_a + m_{\text{м}} = 890 \text{ кг};$$

при $K_3 = 0,6$

$$m_{\text{с}} = 1025 \text{ кг.}$$

49. Масса вторичной части на 1 погонный метр без учета разрезов

$$m_p = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi}{4} [D_n^2 - (D_p + 2h_{\text{вн}})^2] + 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi}{4} 0,5 [(D_p + 2h_{\text{вн}})^2 - D_p^2] \approx 652 \text{ кг.}$$

50. Реактивная ЭДС для однофазной секции

$$e_p = 2v A \xi \pi (D_a - h_p) \cdot 10^{-6} = 0,216 \text{ В,}$$

где

$$\xi = 0,4 \pi \frac{h_1}{b_1} \frac{2}{3} = 2,1.$$

Для сравнения был рассчитан вариант III для машины с диаметром статора 0,65 м, что позволило снизить плотности тока до $j_a \approx 1,19 \text{ А/мм}^2$ и $j_{\text{в}} \approx 1,42 \text{ А/мм}^2$ и повысить КПД до $\eta = 0,615$. Результаты расчетов сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Результаты расчета вариантов

Параметр	Варианты ЦЛДПТ с двухфункциональной обмоткой			ЦЛДПТ с обмоткой на роторе
	I	II	III	
$D_c, \text{ м}$	0,5	0,5	0,65	0,4
$l, \text{ м}$	0,8	0,8	0,8	0,72
$\tau, \text{ м}$	0,2	0,2	0,2	0,12
$D_{\text{н}}, \text{ м}$	0,65	0,65	0,802	0,52
$K_{\text{зап}}$	0,4	0,6	0,6	0,475
j	3,03/3,28	1,94/2,1	1,2/1,42	5,02/3
η	0,56	0,6	0,615	0,51
$m_{\text{м}}, \text{ кг}$	241	376	647	327
$m_{\text{ст}}, \text{ кг}$	648	648	1049	293
$m_{\text{с}}, \text{ кг}$	890	1025	1696	490
$m_{\text{р/лм}}, \text{ кг/м}$	652	652	837	1072
$m'', \text{ кг/(кН} \cdot \text{м)}$	29,7	34,2	56,5	16,3
$\Sigma m, \text{ кг}$	2300	2400	3500	2634
$m', \text{ кг/кВт}$	153,3	160	233,3	175,6

По ряду технологических соображений удобнее сохранить конструкцию качалки с противовесом (рис. 4.16) и установить на ней возвратно-поступательный электропривод на базе МДД с прямолинейным движением. Кинематическая схема привода качалки от МДД показана на рис. 4.19. На рис. 4.20 дана установка привода (как с МДД, так и с электромеханическим преобразованием на станке-качалке ЗСКЗ-75-40). На внутренней поверхности статора и наружной поверхности вращающегося ротора асинхронной машины с кольцами выполнена нарезка (рис. 4.19).

Задача исследования состоит в следующем: для заданных параметров работы определить точку установки концевых переключателей, обеспечивающих достижение статором точки $h=2H$ и $h=0$ со скоростью $v \approx 0$ и переход в движение в обратном направлении с нарастающей до v_{max} скоростью. Возратно-поступательное циклическое движение совершает безобмоточный статор двигателя двойного движения с приведенной суммарной движущейся массой m , преодолевающей вязкое трение $F_D = K_D v$, где K_D — коэффициент вязкости нефти.

Рассмотрим трапецеидальное распределение касательного тягового усилия двигателя F/F_m , где F_m — максимальная сила тяги, по длине перемещения статора h/h_m , где $h_m = 2H$ (рис. 4.18, а — в). Уравнение $F(h) = f(h/h_m)$ для разных интервалов пути запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} F(h) &= F_m (0,5 + \frac{h}{H}) \quad \text{при } 0 < h < \frac{H}{2}; \\ F(h) &= F_m \quad \text{при } \frac{H}{2} < h < \frac{3}{2} H; \\ F(h) &= F_m (2,5 - \frac{h}{H}) \quad \text{при } \frac{3}{2} H < h < 2H. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

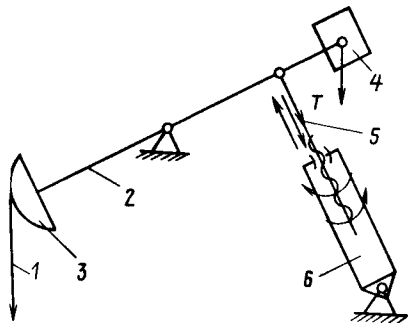


Рис. 4.19. Кинематическая схема станка-качалки с приводом от МДД поступательного движения или электромеханического преобразователя движения: 1 - штанга; 2 - балансиры; 3 - головка балансира; 4 - противовес; 5 - ползун; 6 - электропривод двойного движения либо электромеханический преобразователь

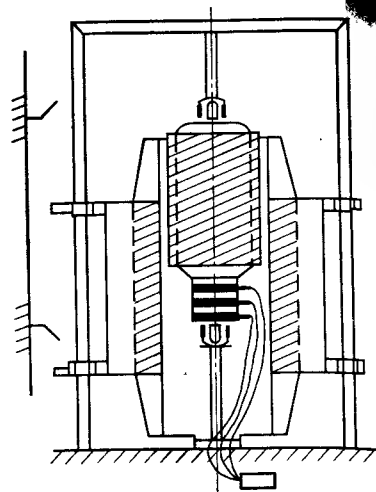


Рис. 4.20. Схема привода с переменным перекрытием ротором статора

Результирующее тяговое усилие, получающееся при использовании линейного привода,

$$F_{\text{рез}} = F(h) - K_d v. \quad (4.22)$$

Полагая, что места установки конечных переключателей находятся на участках I, III (рис. 4.18), результирующее усилие $F_{\text{рез}}$ для участка III при движении от $h=0$ до $h=2H$ равно

$$F_{\text{рез}} = -F_m \left(2,5 - \frac{h}{H}\right) - K_d v. \quad (4.23)$$

Тогда

$$m \frac{dv}{dt} = -F_m \left(2,5 - \frac{h}{H}\right) - K_d v, \quad (4.24)$$

а так как $v = dh/dt$, то это уравнение может быть переписано в виде

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + K_d \frac{dh}{dt} + F_m \left(2,5 - \frac{h}{H}\right) = 0 \quad (4.25)$$

или

$$\frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{K_d}{m} \frac{dh}{dt} + \frac{F_m}{mH} h = -2,5 \frac{F_m}{m}. \quad (4.26)$$

Решение этого неоднородного дифференциального уравнения записывается

$$h = C_1 e^{\left(-\frac{K_d}{2m} + \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}\right)t} + C_2 e^{\left(-\frac{K_d}{2m} - \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}\right)t} + 2,5H. \quad (4.27)$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из условий: при $t=0$ $v = \frac{dh}{dt} = \frac{F_m}{K_d}$, $h = 1,5H$.

Тогда

$$C_1 = \frac{\frac{F_m}{K_d} + H \left(-\frac{K_d}{2m} - \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}\right)}{2 \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}}; \quad (4.28)$$

$$C_2 = \frac{\frac{F_m}{K_d} + H \left(-\frac{K_d}{2m} - \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}\right)}{2 \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}} - H. \quad (4.29)$$

В результате решения дифференциального уравнения движения статора можно определить точку установки концевого переключателя, координата которой по длине перемещения равна

$$h_{\text{III}} = \left(\frac{\frac{F_m}{K_d} - H \frac{\alpha_d}{2m}}{\sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}}} - H \right) \exp\left(-\frac{\alpha_d}{2m} t\right) \operatorname{sh} \sqrt{\frac{K_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}} t + H \left(2,5 - \exp\left(\frac{\alpha_d}{2m} t\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha_d^2}{4m^2} + \frac{F_m}{mH}} t\right)\right). \quad (4.30)$$

Если в качестве примера взять следующие данные: $F_m = 6 \cdot 10^3 \text{ Н}$; $K_p = 10^4 \text{ кг/с}$; $H = 0,375 \text{ м}$; $m = 6 \cdot 10^3 \text{ кг}$; $t = 1 \text{ с}$, то $h_{\text{III}} = 0,623 \text{ м}$, т. е. действительно находится в начале участка III. Симметрично установка концевого переключателя на участке I должна быть в точке $h_1 = 2H - 0,623 = 0,127 \text{ м}$, а участок I соответствует $0 < h < 0,75/4$, т. е. $h_1 < 0,1875 \text{ м}$.

При использовании в качестве базовой машины асинхронного двигателя с переменным перекрытием по рис. 4.20 и, соответственно, с изменяющимся моментом M на валу асинхронной части двигателя (усилием на выходе МДД), пропорциональным перекрытию, а также при противовключении в точках характеристики, соответствующих полному перекрытию по сигналу датчика положения, после выполненного перемещения на участке с постоянной скоростью получаем, используя номинальные характеристики I и 2 (рис. 4.18, в) соответственно прямого и обратного включения, ха-

рактеристику для полного цикла движения (пунктирная линия). Движение начинается, например, в точке *a* с половинным пусковым моментом (соответственно половинному перекрытию); затем доля используемого момента номинальной характеристики *I* возрастает и в точке *A* движение продолжается с постоянной скоростью и номинальным моментом, соответствующим данному скольжению (перекрытие — полное). При достижении точки переключения (концевой выключатель, установленный в точке соответственно приведенному выше расчету и рис. 4.18, б) характеристика переходит в точку *B*, где некоторое время идет движение с той же скоростью, затем переходит к точке остановки *б* (и соответственно меньшему перекрытию — с моментом, меньшим номинального). Затем движение совершается в обратном направлении с нарастанием использования номинального момента соответственно нарастанию перекрытия; в точке *C* движение продолжается в обратном направлении с постоянной скоростью и полным использованием номинального момента (полное перекрытие), по достижении точки переключения (и отработки сигнала переключения) характеристика переходит в точку *D*, отсюда — в точку *a*, завершая цикл. Выбором точки скольжения *s_m*, при котором имеет место максимальный момент, можно получить практически постоянное значение действующего момента или обеспечить близость его кривой к соотношению перекрытий, что позволяет воспользоваться результатами приведенного выше расчета.

Решающим фактором при использовании вращающегося обмотанного ротора, если применить конструкцию МДД по рис. 4.20, являются энергия, необходимая для частых реверсов этого достаточно массивного ротора, и затруднения в обеспечении необходимой частоты циклов. Это показывает проведенный Уфимским СКБ Миннефтепрома расчет мощности, потребляемой электроприводом на принципе двойного движения (например, применительно к условиям работы на станке-качалке).

Исходные данные для расчета:

электропривод двойного движения работает по принципу асинхронного двигателя и имеет на наружной поверхности ротора и внутренней поверхности статора винтовую нарезку с одинаковым шагом;

расчет привода для станка-качалки ведем при использовании в машине движения статорных пластин от серийного двигателя с фазным ротором (например АК82-8);

наружный диаметр ротора 300 мм;

шаг нарезки винтовой линии $S=30$ мм;

ширина канавки винтовой линии $b=7,5$ мм;

глубина нарезки винтовой линии $C=3$ мм;

напряжение питающей сети 380/220 В, $f=50$ Гц;

ход ползуна электропривода 0,75 м;

балансир станка-качалки совершает 15 качаний в минуту, следовательно, по-

за это время совершает 15 движений вверх и 15 движений вниз;

скорость движения ползуна 0,375 м/с;
режим работы — с частными реверсами при электрическом торможении (S7) по ГОСТ 183—74;

коэффициент полезного действия 0,6;

передаточное число привода станка-качалки ЗСК3-0,75-400 $i_0=95$;

максимальная мощность электродвигателя, применяемого на станке ЗСК3-07-400, 4,5 кВт;

номинальная частота вращения 1440 об/мин.

Расчет ведем из предположения, что двигатель станка-качалки мощностью 4,5 кВт создает усилие в точке подвеса шатунов к балансиру станка-качалки для совершения полезной работы по подъему жидкости из скважины.

1. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9550 \cdot 4,5}{1440} = 29,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Момент на тихоходном валу редуктора

$$M_{\text{т}} = M_{\text{ном}} i_0 \eta,$$

где η — КПД передачи от двигателя к балансиру, $\eta \approx 0,8$.

$$M_{\text{т}} = 29,8 \cdot 95 \cdot 0,8 = 2265 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Тангенциальная сила в точке подвеса шатунов

$$T = M_{\text{т}}/r,$$

где r — радиус кривошипа станка-качалки ЗСК3-0,75-400, $r = 144$ мм,

$$T = 2265/0,144 = 15,73 \text{ кН}.$$

4. Поскольку в электроприводе двойного движения заложен принцип винтовой передачи, необходимо рассчитать момент на роторе электропривода для преодоления усилия $T = 15,73$ кН: $M = T \frac{D}{2} \operatorname{tg} \beta$, где $S = 0,03$ м — шаг винтовой нарезки; D — диаметр ротора; $\operatorname{tg} \beta = S/\pi D = 0,03/(3,14 \cdot 0,3) = 0,032$.
 $M = 15,73 \cdot 0,15 \cdot 0,032 = 0,075 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

5. Определяем частоту вращения ротора из расчета средней скорости движения ползуна электропривода $v = 0,375$ м/с:

$$n = \frac{v}{S} i = \frac{0,375}{0,03} 60 = 750 \text{ об/мин}.$$

6. Мощность, затрачиваемая на винте электропривода,

$$P_{\text{пр}} = \frac{Mn}{9550} = \frac{7,5 \cdot 750}{9550} \approx 5,9 \text{ кВт}.$$

Это мощность, расходуемая на выполнение механической работы погружного насоса.

7. Номинальная мощность электропривода

$$P_{\text{ном}} = P/\eta = 5,9/0,6 = 9,8 \text{ кВт}.$$

8. Определяем номинальный ток электропривода:

$$I = \frac{R_{\text{ном}} 10^3}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{9,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 17 \text{ А}.$$

9. Пусковой ток электропривода определяем, принимая кратность пусковых токов, равную 7:

$$I_n = 17 \cdot 7 = 119 \text{ А.}$$

10. Для определения перегрузочной способности электропривода необходимо рассчитать время пуска и торможения. Принимаем за номинальный момент на роторе электропривода момент, развиваемый им на винте и равный 75 Н·м.

$$11. \text{ Принимаем пусковой момент } M_n = 1,4 M_{\text{ном}} = 105 \text{ Н·м.}$$

$$12. \text{ Принимаем максимальный момент } M_{\text{max}} = 2 M_{\text{ном}} = 150 \text{ Н·м.}$$

13. Средний пусковой момент электропривода

$$M_{\text{п. ср}} = (M_n + M_{\text{max}}) / 2 = (105 + 150) / 2 = 127,5 \text{ Н·м.}$$

14. Для быстрой остановки ротора используем торможение противовключением и средний тормозной момент

$$M_{\text{т. ср}} = 0,9 M_n = 0,9 \cdot 105 = 94,5 \text{ Н·м.}$$

15. Суммарный запас кинетической энергии в поступательно движущихся массах рабочего органа (штанги, балансира противовеса)

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1573 - 0,375^2}{2} = 110 \text{ кг·м}^2.$$

16. Суммарный момент инерции (при $J_{\text{дв}} = 2,2 \text{ кг·м}^2$)

$$J_z = 1,25 J_{\text{дв}} + \frac{182}{n^2} W_k = 1,25 \cdot 2,2 + \frac{182}{750^2} 110 = 2,75 + 0,04 = 2,79 \text{ кг·м}^2.$$

17. Среднее ускорение при пуске определяем из формулы $M = M_c - \frac{J_z}{9,55} a$,

где M — момент, развиваемый двигателем (в нашем случае $M_{\text{п. ср}}$); M_c — статический момент нагрузки (в нашем случае он равен нулю); a — ускорение вала привода,

$$a = 9,55 \frac{M_{\text{п. ср}}}{J_z} = \frac{9,55 \cdot 127,5}{2,79} = 435 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}.$$

18. Время пуска

$$t_n = \frac{n}{a} = \frac{750}{435} = 1,7 \text{ с.}$$

19. Ускорение вала привода при торможении определяется по формуле

$$a = 9,55 \frac{M_{\text{т. ср}} + M_c}{J_z} = \frac{9,55 \cdot 94,5}{2,79} = \frac{905}{2,79} = 324 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}.$$

20. Время торможения

$$t_{\text{т}} = \frac{n}{a} = \frac{750}{324} = 2,3 \text{ с.}$$

По условиям работы станка-качалки рабочий ход насоса совершается (при числе качаний балансира 15 качаний в минуту) за 2 с. Вариант по рис. 4.19 не обеспечивает требуемой частоты циклов качалки. Легко показать, что у него и существенно большее, чем у штатного привода, потребление энергии, т. е.

большие эксплуатационные расходы, существенно перекрывающие экономию, связанную с эксплуатацией маслозаполненного редуктора и всей относительно сложной кинематической схемы. Выходом является применение МДД по рис. 4.21, где массивный обмоточный ротор неподвижен и реверсируется лишь промежуточный ротор, имеющий на порядок меньший момент инерции. На рис. 4.21 приняты обозначения: 1 — внутренний неподвижный статор; 2 — его многофазная обмотка; 3 — полый вал-стойка, внутри которой размещены подводящие провода; 4 — второй вал-стойка; 5 — пакет полого цилиндрического ротора; 6 — стержни короткозамкнутого ротора обмотки; 7 — замыкающие кольца обмотки ротора; 8 — винтовая нарезка на наружной части ротора; 9 — опорно-осевые подшипники, на которых вращается ротор; 10 — зубцы пакета полого ротора; 11 — наружный статор; 12 — его внутренняя винтовая нарезка; 13 — направляющие, препятствующие вращению статора 11, но обеспечивающие ему возможность поступательного перемещения; 14 — выступ на статоре, включающий концевой переключатель 15 при движении вниз; 16 — выступ на статоре, включающий концевой переключатель 17 при движении вверх.

Машина работает следующим образом. При подаче многофазного напряжения к зажимам 18 токи в обмотке 2 создадут вращающийся магнитный поток, проходящий по пути: внутренний неподвижный статор 1, внутренний воздушный зазор, зубцы 10 полого цилиндрического ротора 5, их выступы винтовой нарезки 8, внешний воздушный зазор, выступы винтовой нарезки 12 наружного статора, спинка статора 11, снова выступы винтовой нарезки 12, снова внешний воздушный зазор, выступы винтовой нарезки 8, зубцы 10 ротора 5, снова внутренний воздушный зазор и, замыкая путь, снова внутренний неподвижный статор 1.

Взаимодействие вращающегося потока, создаваемого обмоткой 2 с токами в короткозамкнутой клетке, образуемой стержнями 6 и замыкающими кольцами 7, приводит во вращение ротор 5. При этом возникает изменение магнитной энергии W во внешнем воздушном зазоре между выступами винтовых нарезок 8 (ротора 5) и 12 и появляется усилие, пропорциональное dW/dl , где l — относительное смещение упомянутых выступов. Поскольку ротор 5 вдоль своей оси перемещаться не может из-за наличия опорно-осевых подшипников 9, под воздействием указанного усилия начинает перемещаться наружный статор 11 вдоль направляющих 13. Остановка или изменение направления движения осуществляется воздействием выступов статора 14 или 16 на концевые выключатели 15 или 17 соответственно.

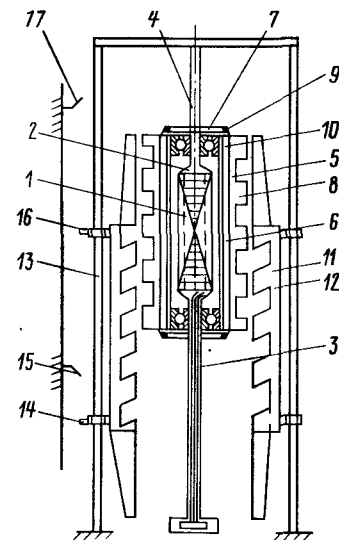


Рис. 4.21. Схема привода с переменным переключением и промежуточным ротором с малым моментом инерции

Существенным достоинством машины по данному варианту является наряду с повышенной надежностью благодаря полному отсутствию каких-либо контактных переходов, изгибающихся кабелей и т. п. еще и высокое быстродействие. Разгону, торможению, изменению направления движения противодействуют лишь малый момент инерции цилиндрического полого ротора 5 и масса полностью безобмоточного наружного статора 11, достигающего при движении лишь относительно небольших скоростей.

Для обеспечения заданного графика усилий при движении может быть использовано неполное перекрытие винтовых нарезок 8 и 12.

Для примера, разобранного выше, примем эквивалентный радиус инерции промежуточного ротора $R = 0,16$ м; масса промежуточного ротора $m = \gamma l D_{cp} b$, где γ — эквивалентная удельная плотность, $\gamma = 4,0 \cdot 10^3$ кг/м³; $D_{cp} = 0,35$ м; ширина кольца $b = 0,012$ м; $l = H = 0,75/2 = 0,375$ м; $m = 17,5$ кг. Тогда $J_z = mR^2 = 17,5 \cdot 0,16^2 = 0,45$ кг·м².

При том же значении W_k имеем суммарный момент инерции $J_z = 1,25 \cdot 0,045 + 0,04 \approx 0,6$ кг·м². Это почти в 5 раз меньше, чем в предыдущем расчете в п. 16.

Оставляя в первом приближении остальные данные неизменными, имеем ускорение вала привода $a = 2030$ (об/мин)/с; время пуска $t_n = 0,37$ с; ускорение вала привода при торможении $a = 1508$ (об/мин)/с; время торможения $t_z = 0,5$ с.

Даже при времени рабочего хода насоса 2 с (15 качаний в минуту) имеем еще отрезок времени $t > 1$ с для движения с постоянной скоростью соответственно рассмотренным выше графикам. Соответственно снижается и потребление энергии — система становится конкурентоспособной с штатным приводом качалки.

Особое значение приобретает быстродействие, достигаемое МДД с промежуточным ротором (рис. 4.21) для роботов, где требуется чаще всего ограниченное поступательное движение с наименьшим значением постоянной электромеханической времени $T = v/a_n$:

$$T = \omega \frac{J_z}{M_n} = \frac{v}{r} \frac{mr^2}{F_n r} = \frac{vm}{F_n} = \frac{v}{a_n}.$$

Рассмотренные выше экспериментальные данные для МДД с поступательно движущимся статором (явно уступающий в быстродействии МДД с промежуточным ротором и медленным движением относительно короткого замыкающего магнитопровода по рис. 4.21) дают значение постоянной времени $T = v/a_n = 0,29/58 = 0,005$ с. Можно ожидать, что у привода робота при скоростях $v \leq 0,2$ м/с и использовании МДД с промежуточным ротором постоянная времени не превысит значения 0,003 с; напомним, что постоянная времени специально отработанных для таких задач приводов фирмы Inland больше в 5—10 раз (см. табл. 2.2); у низкоскоростных двигателей постоянного тока больше в 50—100 раз (см. табл. 2.1).

Использование МДД с промежуточным ротором может стать основой и для привода, создающего неограниченное поступательное движение экипажа относительно лотка или трубы со спиральной нарезкой. При этом в токовой цепи полностью отсутствуют контактные переходы (щетка — коллектор; щетки — кольца и т. п.), необходимые в разобранном выше варианте.

В качестве базовой может быть выбрана любая размещенная на экипаже машина переменного тока — асинхронная (с промежуточным ротором по рис. 4.6, г) или синхронная (рис. 4.22, а) с внутренним статором 1 и промежуточным ротором в виде дуговых постоянных магнитов 2 (рис. 4.22, а — в), у которых внутренняя поверхность гладкая, а на наружной поверхности имеется спиральная нарезка, взаимодействующая со спиральной нарезкой замыкающего магнитопровода 3 — лотка или трубы, закрепленных на пути.

При использовании машины постоянного тока в качестве базовой необходимость в контактном переходе остается: щетки, связанные с промежуточным ротором, скользят по поверхности неподвижного коллектора и имеется контактный переход от неподвижных щеток к кольцам для подачи тока к указанным вращающимся щеткам. На рис. 4.22 схематично показаны направляющие 4, позволяющие экипажу 5 скользить вдоль трубы (или лотка) по соответствующим выемкам или рельсам. Если

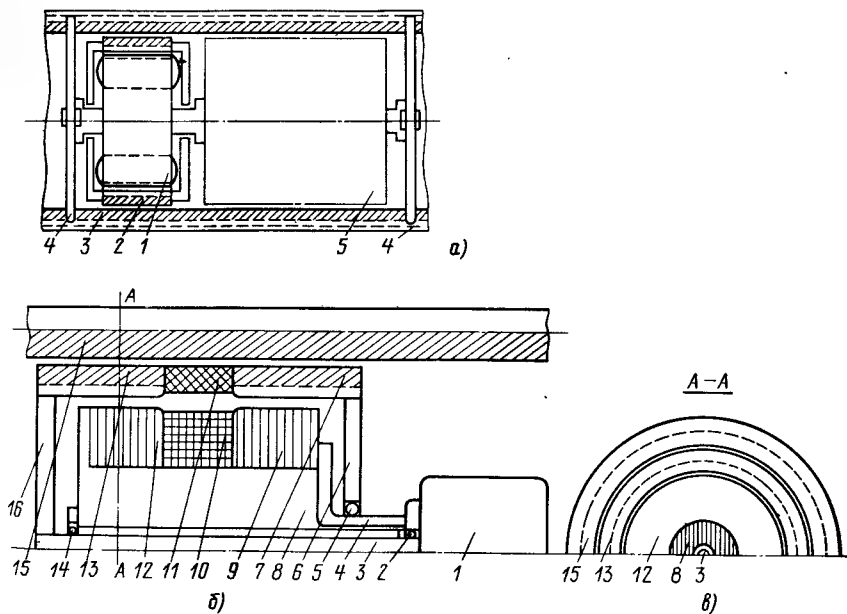


Рис. 4.22. Привод поступательного движения с промежуточным ротором: а — из постоянных магнитов; б, в — с ферромагнитным промежуточным ротором

требуется одновременно создать эффект электромагнитного подвеса, у нижней части трубы создается участок с существенно большим зазором; если требуется прижимание, такой участок создается у верхней части; соответствующие неравномерности зазора могут быть созданы и, например, на поворотных участках пути (для компенсации возникающих поперечных усилий). Выполнение промежуточного ротора в виде постоянных магнитов приведено выше как пример самого простого выполнения; целесообразнее, по-видимому, выполнять дуги промежуточного ротора (внутри — гладкие, снаружи — нарезанные) из ферромагнитного материала и неподвижную катушку возбуждения разместить аналогично машине с когтеобразными полюсами (или бесконтактному сельсину). При базовой асинхронной машине промежуточный ротор имеет вид, соответствующий рис. 4.6, 2, и характер сцепления нарезки наружной поверхности промежуточного ротора с нарезкой внутренней поверхности трубы или лотка соответствует характеру сцепления нарезок 8 и 12 на рис. 4.19. Элементу 11 соответствует неподвижная труба или укрепленный на пути лоток, а элементы 1, 2, 3, а также вращающийся промежуточный ротор 5 со своим креплением 6 размещены на экипаже.

Как уже указывалось, практический интерес представляет применение для создания неограниченного линейного перемещения экипажа вдоль укрепленного на пути лотка или внутри трубы, внутренние поверхности которых снабжены винтовой нарезкой преобразователей движения [69]. Они позволяют использовать обычные двигатели, наиболее отработанные, обладающие высоким КПД и малой металлоемкостью. Описанный выше универсальный преобразователь движения может использовать непосредственно выход двигателя внутреннего сгорания. Однако для вращающихся машин это решение вряд ли является оптимальным, так как при этом требуется предварительно преобразовать вращательное движение в возвратно-поступательное, недостаточно используется и площадь зазора. Более целесообразной, по-видимому, можно считать конструкцию, близкую по идее к так называемому кольцевому трансформатору, подробно рассмотренному в [70, 73]. Применение этой идеи для осуществления линейного неограниченного движения от любого двигателя с вращающимся ротором иллюстрируется рис. 4.22. Двигатель 1 вращает вал 3 в подшипнике 14; с концом вала спицами 16 соединен промежуточный ротор, левая ферромагнитная часть которого 13 соединена неферромагнитным кольцом 11 с правой ферромагнитной частью ротора 7; на наружных цилиндрических поверхностях частей ротора 7 и 13 выполнена спиральная нарезка, взаимодействующая с аналогичной нарезкой на внутренней поверхности трубы или лотка 15. Магнитный поток, создаваемый неподвижной (относительно экипажа) ка-

тушкой 10, замыкается по пути: внутренний магнитопровод 8 (как видно на разрезе по А — А, он может выполняться продольно-шихтованным, например, при применении переменного тока для питания катушки 10), далее через тороид (например, правый тороид 9), зазор между наружной поверхностью тороида и внутренней поверхностью правой части ротора 7 (обе поверхности — гладкие), зазор между спиральными нарезками правой части ротора и трубы или лотка 15, вдоль трубы или лотка к зазору между спиральными нарезками на внутренней поверхности трубы или лотка 15 и наружной поверхности левой части ротора 13, затем через зазор между этой частью ротора и тороидом 12 и листы тороида во внутренний магнитопровод 8. Такое прохождение потока имеет место в каждой радиальной плоскости и мало меняется при вращении промежуточного ротора, что облегчает условия применения для этой цели в катушке 10 «замороженного» тока. При питании катушки 10 постоянным током отпадает необходимость в шихтовке частей магнитопровода, и кольцевая консоль 4 (на наружной поверхности которой предусмотрен подшипник для опоры спиц в правой части ротора 7) может быть выполнена в этом случае вместе со сплошными участками магнитопровода 8, 9 и 12. Как уже указывалось, вполне достижима плотность усилия $F' = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. Потребуется, например, для обеспечения движения 60-тонного вагона на подъем $\alpha = 24\%$ (почти фантастический по сегодняшним представлениям) $F = m g \mu K = 60 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,24 \cdot 1,1 = 155 \text{ кН}$ (здесь K учитывает остальные составляющие сопротивления движению) и площадь взаимодействия нарезок $S = F/F' = 6,2 \text{ м}^2$. При внутреннем диаметре трубы $d = 2 \text{ м}$ необходима длина активных участков промежуточного ротора $l = S/\pi d \approx 1 \text{ м}$, что достаточно, чтобы обеспечить вертикальный подъем клетки массой $m = 14,4 \text{ т}$; для подъема 50-тонной клетки хватило бы 0,35 м длины активной части промежуточных роторов. При выполнении неподвижной части («путевой структуры») в виде лотка исходим из допустимой стрелы прогиба (при размещении лотка, например, между рельсами) $h_{\text{стр}} = 0,15 \text{ м}$, тогда для радиуса $r = 0,75 \text{ м}$ имеем центральный угол дуги лотка $\alpha_{\text{л}} = 75^\circ$, длину дуги лотка $l_{\text{л}} = 0,975 \text{ м}$ и каждый метр длины промежуточного ротора создавал бы тяговое усилие $F = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 0,975 \cdot 1 = 24,4 \text{ кН}$. При суммарной длине промежуточных роторов $l = 2 \text{ м}$ можно обеспечить вполне приемлемый для 60-тонного вагона подъем $\alpha = 9\%$. Если использовать рассмотренную в гл. 3 систему комбинированной тяги, можно обеспечить движение на таком подъеме и при длине промежуточного ротора менее 1 м или при $l = 1,5 \div 2 \text{ м}$ достичь подъема в 15—20%.

Продолжим рассмотрение приложений МДД для привода относительно большой мощности, но с малой угловой скоростью, например для барабанного вакуум-фильтра типа БОК-5, где в

настоящее время применяется электродвигатель мощностью в 1,1 кВт массой в 19 кг ($m'_{дв} = 17,3$ кг/кВт). Общая масса привода включает редуктор массой 1000 кг и $m'_{пр} = 990$ кг/кВт. Номинальная частота вращения выходного вала $n_{ном} = 1,0$ об/мин ($\omega_{ном} \approx 0,105$ 1/с), вращающий момент $M_{ном} = 10^4$ Н·м. Воспользуемся модулями, соответствующими внешним размерам, рассчитанными в предыдущем примере, т. е. $d = 0,05$ м; $l_p = 0,06$ м, но возьмем средний диаметр тороидального статора $D = 2,25$ м. Тогда $N = 96$; $\alpha = 3,75^\circ$ и $\alpha_p = 3$, и стрелка вылета $h_{стр} = 0,34$ мм. Исходя из выполнения конструкции с самоцентрирующимися опорными элементами берем $\delta_{мин} = 0,5$ мм; тогда $\delta_{ср} = \delta_{мис} + (h_{стр}/2) = 0,67$ мм $\approx 0,7$ мм и при $h/\delta = 16$ имеем $h = 11$ мм. При $n = 0,017$ об/с имеем $v = \pi D n = 0,12$ м/с. Частота вращения ротора $n_p = v/h = 1,1$ об/с = 600 об/мин; при значительном скольжении (примерно 0,36) это соответствует синхронной частоте вращений $n_c = 1000$ об/мин, т. е. $2p = 6$. При тех же тепловых нагрузках мощность модуля снизится примерно до 30 Вт. Этой мощности более чем достаточно, можно даже снизить и плотность тока, и количество меди. Масса двигателя увеличится менее чем втрое, поскольку существенно меньше станет спинка статора, а ее масса составляет 2/3 массы стали статора; меньше станет и меди еще и потому, что зазор вдвое меньше. Остается проверить достаточность площади сцепления.

Из (4.15) имеем $M = 2,83F'D^2d = 1 \cdot 10^4$ Н·м (при $F' = 1,4 \cdot 10^4$ Н/м², что для малых зазоров вполне достижимо). Модули, выбранные для предыдущей задачи, не являются оптимальными для этой задачи, так как при несколько большем диаметре модулей и меньшей длине можно было бы получить существенно меньший диаметр тороидального статора, но при этом общая масса двигателя заметно не изменилась бы.

Применение для решения этой задачи серийных дугостаторных двигателей не позволяет обеспечить частоту вращения 1 об/мин, так как синхронная скорость для относительно небольшого двигателя ($P_2 = 6$ кВт) СД16-254-115-90 $n = 300$ об/мин, а наименьшее значение частоты вращения $n = 150$ об/мин имеется лишь у довольно мощного двигателя ($P_2 = 150$ кВт) СД400-755-94-400. Получить у такой машины снижение частоты вращения в 300 раз возможно только с применением преобразователей частоты на очень малые частоты.

Рассмотрим в заключение привод существенно большей мощности и несколько большей частоты вращения — привод эскалатора метро. За основу для сравнения возьмем распространенный эскалатор ЭМ-4 [45] со скоростью движения $v = 0,94$ м/с. К сожалению, наиболее простое решение — установка под ступеньками эскалатора разрезных полюсов ДПТ затруднено из-за того, что ступеньки не являются несущими (в направлении тяги) элементами конструкции. Поэтому основным вариантом размеще-

ния безредукторного привода является вал так называемой звездочки — силового элемента, в существующей конструкции связанный с выходным валом тихоходного (второго) редуктора с частотой вращения 9,5 об/мин ($\omega \approx 1$ с⁻¹). При мощности примерно 100 кВт, подаваемой на звездочку (мощность устанавливаемого в настоящее время двигателя 125 кВт, но общий КПД двух редукторов $\eta \approx 0,8$), момент $M_{ном} \approx 10^5$ Н·м. Использование обычных двигателей переменного тока привело бы к 630-полюсной синхронной машине, или к 500-полюсной асинхронной при значительном скольжении. Это малореальные конструкции.

Вполне возможно спроектировать для этой цели специальную машину постоянного тока, близкую по типу МП4000-32У4 (см. табл. 2.1), но с частотой вращения, в 3,5 раза меньшей, и в 20 раз меньшей мощностью. Если бы удалось сохранить в ней ту же удельную массу $m'' \approx 150$ кг/(кН·м), то при потребном моменте $M = 100$ кН·м имели бы массу двигателя порядка 15 т, что все же меньше, чем суммарная масса применяемых редукторов 18 т. Задача проектирования таких двигателей и анализ осуществимости приведенных показателей не являются предметом данной книги. Здесь рассмотрим вариант на переменном токе — асинхронные МДД и вариант на постоянном токе — ЛДПТ в дугостаторном выполнении.

Определим основные параметры МДД для этой цели. Для обеспечения на оси звездочки $M_{ном} = 10^5$ Н·м требуется при удельном усилии $F' = 1,6 \cdot 10^4$ Н/м² по (4.15) $D^2d = 2,2$ м³; при $D = 2,5$ м имеем $d = 0,35$. При $\alpha = 60^\circ$ имеем $N = 360/\alpha = 60$; $\alpha_{рот} \approx 4,8^\circ$; $h_{стр} = 1,15$ мм, при $\delta_{мин} = 0,9$ мм и $l_p = 150$ мм имеем $\delta_{ср} = \delta_{мин} + h_{стр}/2 \approx 1,5$ мм.

Линейная скорость на окружности диаметром D будет $v = 1,25$ м/с. При частоте вращения ротора $n_p = 48$ об/с имеем $h = v/n_p = 0,026$ м = 26 мм, т. е. $h/\delta = 17,3$, что близко к оптимальному соотношению.

Наружный диаметр пакета статора машины $Da = 0,52$ м; если считать весь объем тороидального статора V заполненным материалом с удельной плотностью $\gamma = 5$ кг/дм³ и принять массу остальных элементов конструкции примерно равной 0,1 массы активных материалов двигателя, имеем общую массу $m = 9,2$ т, вдвое меньшую, чем масса редукторов существующей конструкции. Можно ожидать, что у специально сконструированной машины можно, оптимизируя соотношения размеров, еще снизить эти значения, но и соотношения $m' = 92$ кг/кВт и $m'' = 92$ кг/(кН·м) достаточно высокие для тихоходной асинхронной машины.

Оценим массу дугостаторной машины на базе ЛДПТ, согнутого в окружность большого диаметра (сохраним $D = 2,5$ м). Поскольку при этом $v = 1,25$ м/с и имеется ось, синхронизированная с осью ротора, можно обойтись коллекторным ком-

мутатором, используя, например, коллекторный узел от машины постоянного тока соответствующей мощности, к зажимам которого должны быть подсоединены секции якоря (статора) ЛДПТ, а система вращающихся щеток цепи якоря и цепи возбуждения при использовании двухфункциональной обмотки кольцами должна быть укреплена на оси ротора. При $F' = 2 \cdot 10^4$ Н/м² требуется величина рабочей площади зазора $S = 4$ м², ширина машины $b = 0,51$ м, что примерно соответствует размерам МДД.

Удельная масса такого ЛДПТ, как указывалось в § 3.2, примерно 100 кг/кН, что дает массу машины $m \approx 10$ т (с учетом узла коллектор — вращающиеся щетки $m = 11$ т). С учетом необходимого увеличения массы меди для повышения КПД (при $v = 1,25$ м/с и $J = 4 \div 5$ А/мм² КПД не превышал $\eta = 0,25$, только при снижении плотности тока до 1,5 А/мм² можно довести КПД до $\eta \approx 0,5 \div 0,55$, т. е. требуется примерно утроение количества меди) общая масса достигнет $m \approx 13$ т. Это меньше, чем при редукторном приводе, но больше, чем в приводе с МДД.

Для больших мощностей привода возможно применение модульных колес нескольких тороидальных статоров, выполняемых с самоцентрирующимися роторами, надеваемых, например, на барабан цилиндрической мельницы, причем в качестве действительно неподвижной части используются расположенные, например, под мельницей выступы, проходящие через прорези статоров в пазы опорных элементов роторных систем.

Оценим параметры МДД для столь крупного устройства, как привод мощностью 6300 кВт цилиндрической мельницы, данные которого приведены в гл. 2. Возьмем $D = 12$ м (у двигателя СДТН диаметр 9,2 м при длине в 2,58 м и требуется еще весьма громоздкий преобразователь частоты) и выполним МДД на уже указанных выше модулях. Тогда обеспечивается необходимая величина момента $M = 2,83F'D^2d \approx 4200$ кН·м.

Приведенных данных вполне достаточно для оценки целесообразности детальной проработки систем с электромеханическим преобразователем, а также МДД в качестве тихоходного безредукторного электропривода как для поступательного, так и для вращательного движения, особенно для мощных приводов.

В целом рассмотрение материалов книги позволяет утверждать, что:

выбор высокоскоростного двигателя с механическим редуктором для тихоходного привода далеко не всегда является наилучшим решением;

массогабаритные и динамические показатели безредукторного привода не уступают соответствующим показателям привода с редуктором;

для частот вращения порядка десятков оборотов в минуту или меньше машины переменного тока могут применяться только с преобразователями частоты при не слишком благоприятных

массогабаритных показателях, и применение для решения этой задачи машин двойного движения с быстрым вращением роторов и медленным вращением статора либо электромеханических преобразователей движения может существенно упростить и удешевить привод и улучшить его массогабаритные показатели;

для тихоходного привода поступательного движения весомые преимущества на стороне машины двойного движения с быстрым вращением ротора и медленным поступательным перемещением статора (для относительно короткоходовых приводов) и на стороне линейных двигателей, в частности постоянного тока, и в особенности с безобмоточной возбужденной вторичной частью (для длинноходовых приводов);

машины постоянного тока вращательного типа могут применяться и для частот вращения порядка десятков оборотов в минуту и несколько ниже, а линейного типа — для скоростей перемещения порядка нескольких метров в секунду и ниже с использованием обычного коллектора, причем для повышения заметно снижающихся при этом энергетических показателей может быть рекомендовано уменьшение плотности тока в обмотках;

на базе машин двойного движения поступательного перемещения (особенно с промежуточным ротором) может быть создан быстродействующий электропривод роботов, а также возвратно-поступательный привод со значительной частотой качаний; на этой же основе может быть обеспечено неограниченное перемещение экипажа вдоль лотка или внутри трубы со спиральной нарезкой с показателями, существенно превышающими данные обычного линейного электропривода, применяемого для этих целей;

существенное для привода и машиностроения в целом преобразование вращательного движения в возвратно-поступательное и обратно, редуцирование линейной и угловой скоростей, а также преобразование возвратно-поступательного в неограниченное линейное перемещение вдоль плоского или дугообразного пути может быть обеспечено нетрадиционными способами при использовании системы контактного или бесконтактного (электромагнитного) сцепления разнонаправленных винтовых поверхностей.

Возможности развития электропривода и электромашины далеко не исчерпаны и ждут Ваших дальнейших трудов, читатель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенштейн Б. М. Линейные электродвигатели // Итоги науки и техники / Электрические машины и трансформаторы. М.: ВИНТИ, 1975. Т. 1.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1982. Т. 1.
3. Артоболевский И. И., Кобринский А. Е. Роботы. М.: Машиностроение, 1970.
4. Астахов П. Н. Справочник по тяговым расчетам. М.: Транспорт, 1973.
5. Бабат Г. И. Токи высокой частоты. М.: Знание, 1956.
6. Беликов В. Т., Эль-Амин М. Р. Двугостаторный двигатель постоянного тока // Изд. Респ. Межвед. научно-техн. общ., 1978. Вып. 27. С. 108—113.
7. Бертинов А. И., Варлей В. В. Электрические машины с катящимся ротором. М.: Энергия, 1969.
8. Будиг П. К. Некоторые замечания по расчету трехфазных линейных электродвигателей с малыми синхронными скоростями // Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом / Новосибирск: НЭТИ, 1975. С. 9—24.
9. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М.: Энергоатомиздат, 1982.
10. Линейные электродвигатели: современное состояние и перспективы // РЖ ВИНТИ Электрические машины и трансформаторы. 1986, № 10. С. 143—148.
11. Веселовский О. Н., Полевский В. И. Линейные синхронные двигатели с электромагнитной редукцией скорости движения // Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом. Новосибирск: НЭТИ, 1973. С. 92—102.
12. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974.
13. Вилкитис А. Я., Дриц М. С. Концевой эффект в линейных асинхронных двигателях. Рига: Зинатне, 1981.
14. Винокуров В. А., Козаченко Е. В. Техничко-экономические показатели ОЛАД для ВСНТ // Тр. МИИТ. Вып. 572. 1981. С. 57—65.
15. Воробьев А. В. Респонсинный привод. М.: Машиностроение, 1978.
16. Ганзбург Л. Б. Механизмы с магнитной связью. М.: Машиностроение, 1973.
17. Горелова Г. В., Здор В. В., Свечарник Д. В. Метод оптимума номинала и его применение. М.: Энергия, 1970.
18. Грищенко А. В., Настенко К. И. Динамические испытания линейного асинхронного двигателя с использованием рельсового пути в качестве реактивной полосы // Перспективы применения линейных электродвигателей на новых видах транспорта: Киев: УкрНИИТИ, 1979.
19. Гусельников Э. М., Ротт В. Ф. Электрогидравлические толкатели. М.: Энергия, 1968.
20. Длугий В. А. Приводы машин: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982.
21. Егоров Ю. Н. Система привода роботов. Л.: ЛГУ, 1982.
22. Структура механизмов, приводимых асинхронными двигателями общего промышленного назначения / Г. М. Ефимов, Б. В. Заикин, Г. С. Курбатова // Электротехника. 1978. № 9. С. 10—14.
23. Ивоботенко Б. А. Линейный шаговый электропривод // Тр. МЭИ. 1972. Вып. 149.
24. Ивоботенко Б. А., Луценко В. Е., Гониашвили Э. С. Двухкоординатные шаговые электродвигатели поступательного перемещения // Тр. МЭИ. 1976. Вып. 285.
25. Ивоботенко Б. А., Мелкумов Г. А. Линейные электродвигатели // Важнейшие изобретения года. М.: ВНИПИ. 1977.
26. А. с. 1313596 СССР. Линейный реверсивный шаговый электродвигатель / Ивоботенко Б. А. и др. // Бюллетень изобретений. 1960. № 17.
27. А. с. 355720 СССР. Устройство для управления m -фазным шаговым двигателем / А. А. Сазонов, В. А. Федукин // Открытия. Изобретения. 1972. № 31.
28. А. с. № 504278 СССР. Линейный шаговый электродвигатель / Ивоботенко Б. А., Луценко В. Е. // Открытия. Изобретения. 1976. № 7.
29. А. с. № 476640 СССР. Линейный шаговый электродвигатель / Ивоботенко Б. А., Луценко В. Е. // Открытия. Изобретения. 1975. № 25.
30. Ижеля Г. И., Ребров С. А., Шаповаленко А. Е. Линейные асинхронные двигатели. Киев: Техника, 1975.
31. Иосифьян А. Г., Свечарник Д. В. Сельсины. М.: Госэнергоиздат, 1941.
32. Исаев И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. М.: Транспорт, 1970.
33. Каасик П. Ю. Тихоходные безредукторные микроэлектродвигатели. М.: Энергия, 1974.
34. Каасик П. Ю. Индукторный двигатель двойного питания // Бесконтактные электрические машины. Рига: Зинатне, 1971. С. 227—246.
35. Каган В. Г. Электропривод с предельным быстродействием. М.: Энергия, 1975.
36. Анализ требований к электромеханическим модулям постоянного тока промышленных роботов / В. М. Казанский, Ю. А. Сабинин, Л. М. Малинин и др. // Электричество. 1983, № 2. С. 9—11.
37. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962.
38. Каталог фирмы National Flot Motors.
39. Катыс Г. П. Информационные роботы и манипуляторы. М.: Энергия, 1968.
40. Смешенные электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим, И. П. Копылов, Д. В. Свечарник и др. М.: Энергия, 1969.
41. Копылов И. П., Маринин Ю. С. Тороидальные двигатели. М.: Энергия, 1971.
42. Краузе Г. Н. Редукторы: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1972.
43. Линейные электродвигатели общепромышленного назначения. Проспект Минвуз СССР. Новосибирск: НЭТИ, 1976.
44. А. с. № 77023 СССР. Аппарат для автоматического управления нажимным устройством прокатного стана / Д. И. Марьяновский, Д. В. Свечарник // Приоритет от 25.11.1935.
45. Лейтвейт И. Электрические машины с поступательным движением: Пер. с англ. Прос. IEEE. 1970. Vol. 58. № 4.
46. Москвитин А. И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
47. А. с. 68211 СССР. Электрическая машина / А. И. Москвитин // Бюллетень изобретений. 1944. № 1.
48. Москвитин А. И. Электрическая машина с катящимся ротором // Электричество. 1947. № 3.
49. Меклер А. Г. Линейный электропривод подъемно-транспортных машин // Электротехника. 1976. № 8. С. 24—27.
50. Пат. № 48—29243 Япония. Роликовый коммутатор для линейного двигателя постоянного тока / Мацуи.
51. Пат. № 48—6724 Япония. Линейный двигатель постоянного тока с управляющим рельсом / Мацуи.
52. Наземный транспорт 80-х годов. М.: Мир, 1974.
53. Насар С. А., Болдея И. Линейные тяговые электрические машины. М.: Транспорт, 1981.
54. Никифоров Б. Д., Свечарник Д. В. Особенности применения линейных электродвигателей в промышленных и транспортных установках // Электричество. 1983. № 10.

55. Олейник О. М., Полищук И. Е. Эскалаторы. М.: Машгиз, 1973.
56. Основы теории автомобиля и трактора / В. В. Иванов и др. М.: Высшая школа, 1970.
57. Чиликин М. Г., Соколов М. М., Терехов В. М. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974.
58. Павлов Б. И. Шарикоподшипниковые винтовые механизмы. Л.: Знание, 1966.
59. Паскаль Ж. П. Линейный электродвигатель Жана Гембале // Железные дороги мира. 1981, № 1.
60. Петленко Б. И. Линейный электропривод и тенденции его развития // Электричество. 1981, № 9. С. 43—47.
61. Петленко Б. И. Приводы поступательного движения и их выбор // Вестник машиностроения. 1982, № 7. С. 19—22.
62. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1969.
63. Проектирование тяговых электрических машин / Под ред. М. Д. Находкина. 2-е изд. М.: Транспорт, 1976.
64. Сарапулов Ф. Н., Бегалов В. А., Иваницкий С. В., Иваницкий В. В. ЛАД с короткозамкнутыми стержнями // Электричество. 1982, № 2.
65. Свечарник Д. В. О предельной добротности электрических двигателей // Электричество. 1985, № 12.
66. Свечарник Д. В. Надежность и эффективность действия сложных автоматических систем. М.: Знание, 1971.
67. Свечарник Д. В. Задача об оптимальности номинала при вероятностных расчетах // Тр. Ин-та Машиноведения АН СССР. 1957. Вып. 10.
68. Свечарник Д. В., Нарешелашвили Д. Г. Об одном способе повышения эффективности работы энергетических систем // Изв. вузов. Сер. электромеханика. 1980, № 10. С. 1027—1032.
69. Свечарник Д. В., Нарешелашвили Д. Г. Методические указания по расчету на ЭЦВМ электрических параметров силовых трансформаторов при вероятностной оценке характеристик нагрузки. М.: МИИТ. 1982.
70. Свечарник Д. В. Дистанционные передачи. 3-е изд. М.: Энергия, 1974.
71. Свечарник Д. В. Линейный электропривод. М.: Энергия, 1979.
72. Свечарник Д. В. Электромеханические преобразователи движения // Электричество, 1988, № 6.
73. Свечарник Д. В. Дистанционные передачи. М.: Госэнергоиздат, 1959.
74. А. с. 1245454 СССР. Транспортное средство / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1986, № 27.
75. А. с. 877731 СССР. Линейная электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1981, № 40.
76. А. с. 674165 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1979, № 26.
77. А. с. 640402 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1979, № 48.
78. А. с. 748707 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1980, № 26.
79. А. с. 792512 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1980, № 48.
80. А. с. 845238 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1981, № 25.
81. Свечарник Д. В. Сельсины и их применение в автоматизации производственных процессов. М.: Госэнергоиздат. 1962.
82. А. с. 677049 СССР. Бесконтактная магнитная червячная передача / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1979, № 28.
83. А. с. 1295104 СССР. Преобразователь движения / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1987, № 8.
84. А. с. 1318468 СССР. Стрелочный электропривод / Д. В. Свечарник и В. А. Костина // Открытия. Изобретения. 1987, № 23.
85. А. с. 1092674 СССР. Электрическая машина / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1984, № 18.

86. А. с. 731520 СССР. Бесконтактный сельсин / Д. В. Свечарник, Н. Т. Шаваршян // Открытия. Изобретения. 1980, № 16.
87. А. с. 633756 СССР. Транспортная система / Д. В. Свечарник, С. Н. Байбаков, Б. Д. Никифоров, Л. И. Скиба // Открытия. Изобретения. 1978, № 43.
88. А. с. 1335760 СССР. Преобразователь движения / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1987, № 33.
89. Пат. 1233733 (Англия) Д. В. Свечарник. Бесколлекторный двигатель. 1968. № 40107/68.
90. Пат. 355530 (США). Бесколлекторный электродвигатель / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1968, № 787313.
91. Пат. 1802355 (ФРГ). Бесколлекторный двигатель однофазного тока / Д. В. Свечарник // Открытия. Изобретения. 1968, № 353532.
92. Седракан М. Г. К вопросу о надежности исполнительных механизмов электрической ветви ГСП // Приборы и системы управления. 1970, № 7.
93. Слежановский О. В. Реверсивный электропривод постоянного тока. М.: Металлургия, 1967.
94. Развитие асинхронных двигателей общего назначения / Т. Г. Сорокер, В. И. Радин, Э. К. Стрельбицкий и др. // Электротехника, 1978, № 8. С. 3—7.
95. Типаж мотор-редукторов на 1981—1985 гг. М.: Изд. НИИМаш. 1980.
96. Тищенко Н. А. Проблемы надежности электродвигателя // Электричество. 1961, № 11, 12.
97. Толкачев Э. А. Дугостаторные и линейные синхронные машины с магнитоэлектрическим возбуждением. Л.: ЛГУ, 1974.
98. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. М.: ГИФМЛ, 1959.
99. Филиппов Б. А., Ильинский Н. Ф. Основы электропривода. М.: Изд. МЭИ, 1977.
100. Фридкин П. А. Безредукторный дугостаторный электропривод. М.: Энергия, 1970.
101. Черчвин К. П. Исследование в области линейных асинхронных двигателей в США // Ежемесячный бюллетень Международной ассоциации ж.-д. Конгрессов. 1968, № 4. С. 27—38.
102. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. М.: Энергия, 1981.
103. Штурман Г. И. Индукционные машины с дугowymi и плоскими статорами // Научно-технические статьи ХЭТИ / М.: Госэнергоиздат, 1948. Вып. 7. С. 178—200.
104. Штурман Г. И., Левин Н. Н. Индукторная асинхронная машина. Рига: Зинатне. 1981.
105. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1976.
106. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
107. Direct Drive Torque Motors // Control Engineering. July 1963.
108. Пат. 12581 (Англия). Electric railways (lifts, machine) Zehden A.
109. Линейные электродвигатели типа ЛИД. Электроимпекс. София. ДСО. Елпром.
110. Laitwaite E. R. Linear motors with transverse flux // Proc. IEEE. 1971. Vol. 118, № 12. P. 1761—67.
111. Bahke E. Transport system Heute und Morgen. Mainz // Krausskopf Verlag. 1973.
112. Rummich E. Synchrone Linear maschinen // Bull. SEV. 1972. Bd. 63. № 23. S. 1338—1344.
113. Green G. W., Paul K. J. A Performance of d. c. linear machines based on an assessment of flux distributions // Proc. IEEE. 1969. Vol. 116. № 4. P. 599—604.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Электродвигатель и электропривод	5
1.1 Основные задачи электропривода и его составные части	5
1.2. Динамические показатели электропривода	15
1.3. Энергетические показатели редукторного и безредукторного электропривода	23
Глава 2. Устройства с электрической редукцией	31
2.1. Многополюсные машины	31
2.2. Низкоскоростные электрические машины малой мощности	41
2.3. Электрическая машина с катящимся ротором	57
2.4. Респонсинный привод	62
Глава 3. Линейные и дуговые электродвигатели	65
3.1. Линейные электродвигатели как основа безредукторного электропривода поступательного движения	65
3.2. Линейные асинхронные двигатели	75
3.3. Линейные синхронные и автосинхронные (постоянного тока) двигатели ЛСД и ЛАСД (ЛДПТ)	92
3.4. Расчет макета ЛД с разрезными полюсами	115
3.5. Линейный электропривод для безрельсового транспорта	124
3.6. Дугостаторный безредукторный электропривод	131
Глава 4. Безредукторный электропривод на базе машин двойного движения	134
4.1. Основные предпосылки и принципы построения машины двойного движения	134
4.2. Элементы анализа и оценочные расчеты	153
4.3. Сравнительное рассмотрение альтернативных решений некоторых типовых задач создания низкоскоростного электропривода	177
Список литературы	204